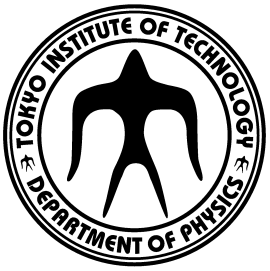
2009 年度

学士論文

不安定核二次反応のための大型中性子検出器の開発



東京工業大学 理学部 物理学科

06-10773

佐古 貴行

指導教官 中村隆司

2010/03/26

概要

理化学研究所において新たな不安定核ビーム生成施設 RIBF(**R**adio **I**sotope **B**eam **F**actory) が 2007 年に稼働を始めた。RIBF の登場によりウランまでの全元素を高エネルギーかつ大強度で発生させることが可能となった。これにより今まで不可能であったより重い中性子過剰な原子核の研究が可能となり、中性子過剰核に見られる特有な現象である中性子ハロー核や中性子スキン核、ダイニュートロン、ピグミー共鳴、また、中性子過剰な領域で進むとされる天体中での元素合成過程 r-プロセスなどへの理解が進むと期待されている。

このような対象を研究するためには運動学的に完全な測定が必要であり、さらに不安定核ビームの高エネルギー化に伴い、より大型の高効率な中性子検出器の開発が不可欠なものとなっている。

本研究では RIBF で使用する大型中性子検出器 NEBULA の開発ならびにテストを行った。さらに、キャリブレーションのためのシミュレーターを開発、宇宙線のシミュレーションを行い、エネルギー較正のためのエネルギー損失分布のピーク値を求めた。また、NEBULA とプロトタイプ検出器を使った実験と比較を行い、実験結果の再現に成功した。

目次

第 1 章　序 1
1.1 RIBF . . . 1
1.2 中性子過剰領域の物理 . . . 2

第 2 章　大型中性子検出器開発の目的 7
2.1 不変質量法 Invariant mass method . . . 7
2.2 SAMURAI . . . 9
2.3 SAMURAI でのセットアップ . . . 12
2.4 大型中性子検出器の目標 . . . 13

第 3 章　大型中性子検出器の概要 15
3.1 NEBULA の構成要素 . . . 15
3.2 ID の設定 . . . 20
3.3 現在の開発状況 . . . 20

第 4 章　シミュレーターの開発 21
4.1 目的 . . . 21
4.2 概略 . . . 21
4.3 座標の設定 . . . 21

第 5 章　シミュレーション結果 25
5.1 エネルギー分布 . . . 25
5.2 天頂角分布 . . . 25
5.3 方位角分布 . . . 28
5.4 VETO から中性子検出器への入射粒子数 . . . 30
5.5 飛跡の長さ分布 . . . 32
5.6 エネルギー損失分布 一次元 . . . 35

第 6 章　テスト実験 41
6.1 光電子増倍管のゲインテストと ID 設定 . . . 41
6.2 光電子増倍管の信号チェック . . . 42
6.3 VETO 検出器部のテスト . . . 43
6.4 NEBULA での宇宙線の観測 . . . 48
6.5 シミュレーションの評価実験 . . . 50

第 7 章　まとめと今後の展望 59

Appendix.A　NEBULA 61
A.1　NEBULA の構成要素の詳細 . . . 61
A.2　ジオメトリ . . . 81
A.3　光電子増倍管の ID 設定 . . . 82
A.4　HV channel 設定 . . . 85
A.5　架台への保持方法 . . . 92
A.6　1 台目のスタックの問題点 . . . 98

Appendix.B　**シミュレーション** 101
B.1　宇宙線 Cosmic ray . . . 101
B.2　ミューオンのエネルギー分布 . . . 102
B.3　乱数発生器 Random number generator . . . 104
B.4　エネルギー損失 Energy loss . . . 104
B.5　ランダウ分布の近似式 . . . 110
B.6　Cern library . . . 112
B.7　減衰長 attenuation length . . . 113
B.8　飛跡の長さ Flight length . . . 114
B.9　VETO でのカウントレート . . . 131
B.10　コンクリート・土壌による補正 . . . 132
B.11　ジオメトリの予測値 . . . 143
B.12　シミュレーション結果の補足 . . . 143

Appendix.C　**その他** 149
C.1　中性子検出の原理 . . . 149
C.2　クロストークイベントの排除 . . . 152
C.3　光電子増倍管の信号チェック時の実験条件 . . . 152
C.4　ペデスタル補正 . . . 152

参考文献 155

図目次

1.1 RIBF の鳥瞰図 [5]: 従来施設 (水色) に新たに RIBF(赤色) が加わった。 1
1.2 各々の加速器で得られる不安定核ビームのエネルギー [5] 2
1.3 核図表 [5]: 水色の領域が従来施設で生成可能な領域、赤色の領域が RIBF で生成可能な領域である。青の矢印は r-プロセスを示す。 3
1.4 Mg までの核図表： 黒は安定核、赤は陽子過剰核、青は中性子過剰核を表す。黄、橙はそれぞれ現在知られている中性子スキン核および中性子ハロー核を表す。 3
1.5 中性子スキン核の模式図 4
1.6 一中性子ハロー核 ^{11}Be： コアの ^{10}Be の周りに 1 個の中性子が薄く広がっている。 4
1.7 二中性子ハロー核 ^{14}Be： コアの ^{12}Be の周りに 2 個の中性子が薄く広がっている。 4
1.8 (a) 安定核近傍、(b) 中性子過剰領域、(c) 中性子ドリップライン近傍でのポテンシャルと陽子 · 中性子の密度分布 5

2.1 不変質量法の例： ^{19}C のクーロン分解 8
2.2 相対エネルギーのスペクトル [14]： (a)$^{19}\mathrm{C} \to {}^{18}\mathrm{C} + \mathrm{n}$ において E_{rel} のピークが確認できる。 8
2.3 SAMURAI[5] 10
2.4 SAMURAI の回転可能な双極磁石 [15]： 測定の種類に応じて設定を変えることができる。 10
2.5 RIBF のビームライン： 円の位置に SAMURAI が作られる。 11
2.6 SAMURAI でのセットアップ (top view)[15] 12
2.7 SAMURAI でのセットアップ (side view)[15] 12

3.1 NEBULA の概観 (1 スタック目)： まだ右半分の中性子検出器部とエレクトロニクス部は設置されていない。 17
3.2 NEBULA の概観 (1 スタック目)： VETO 検出器部を外した状態 17
3.3 NEBULA：VETO 検出器部と中性子検出器部 17
3.4 (左)： 中性子検出器部の 1 モジュール (右)： VETO 検出器部の 1 モジュール [17] 18
3.5 VETO：壁で反射した荷電粒子 (上段) や前方のスタックで発生した陽子 (中段) などを排除し、中性子のみを検出する。 18
3.6 NEBULA の正面ならびに側面図： 青で囲った部分が VETO 検出器部、緑で囲った部分が中性子検出器部である。VETO は荷電粒子排除のため中性子検出器部の前面に配置される。 19
3.7 NEBULA の背面ならびに側面図 :緑で囲った部分が中性子検出器部、橙で囲った部分がエレクトロニクス部である。 19
3.8 NEBULA の ID：数字は ID、黒字は既に設置済み、赤字はこれから設置予定であることを示す。 . . . 20

4.1 シミュレーションのイメージ： 緑は中性子検出器、青は VETO を表す 22

4.2 RIBF 実験棟の外観：シミュレーション中でラフに再現した 22
4.3 ミューオンの位置・角度に応じて中性子検出器中での飛跡の長さ (赤線の部分) を算出、これを元にエネルギー損失を計算する 22
4.4 座標の設定 23

5.1 エネルギー分布：地上 (黒)、地下 (緑)、VETO(青)、VETO⊗ 中性子検出器 (赤)　横軸：ミューオンのエネルギー [GeV]　縦軸：カウント 26
5.2 天頂角分布　上段：地上 (青)、実線 (黒):$\cos^2\theta$ によるフィット。右上の P1 はフィットに関するパラメーターであり、今回の場合は $\cos^2\theta$ にかかる係数を表す。　下段：地下の VETO(青)、VETO⊗ 中性子検出器 (赤)　横軸：天頂角 θ[°]　縦軸：カウント 27
5.3 VETO と中性子検出器の位置関係 28
5.4 方位角分布　上段：地上 (黒)　下段：VETO(青)、VETO⊗ 中性子検出器 (赤)　横軸：方位角 φ[°]　縦軸：カウント 29
5.5 方位角分布 (コンクリート・土壌補正無し)　上段：地上 (黒)　下段：地下 (緑)、VETO(青)、VETO⊗ 中性子検出器 (赤)　横軸：方位角 φ[°]　縦軸：カウント 30
5.6 各 VETO から各中性子検出器へのミューオンの入射個数　青：前面、赤：背面、　横軸：中性子検出器 ID　縦軸：カウント 31
5.7 飛跡の長さ分布 (VETO105) N101 〜115 横軸:飛跡の長さ [cm] 縦軸:カウント 33
5.8 飛跡の長さ分布 (VETO105) N116 〜130 横軸:飛跡の長さ [cm] 縦軸:カウント 34
5.9 飛跡の長さ分布　赤：D-F(中性子検出器前面から背面へ) のみ、青：D-F 以外全てのパス　横軸：飛跡の長さ [cm]　縦軸：カウント 35
5.10 エネルギー損失分布 (VETO105 と中性子検出器 101〜115)　横軸:エネルギー損失 [MeV]　縦軸:カウント　緑:上部 PMT、青:下部 PMT、赤:相乗平均 37
5.11 エネルギー損失分布 (VETO105 と中性子検出器 116〜130)　横軸:エネルギー損失 [MeV]　縦軸:カウント　緑:上部 PMT、青:下部 PMT、赤:相乗平均 38
5.12 コンクリート・土壌補正の効果の例　青:VETO105⊗ 中性子検出器 112 のエネルギー損失 (コンクリート・土壌補正無し)、赤:VETO105⊗ 中性子検出器 112 のエネルギー損失 (コンクリート・土壌補正有)、上段:スケールを合わせず独立にプロット、下段:スケールを合わせて同時にプロット、横軸:エネルギー損失 [MeV]、縦軸:カウント 39
5.13 エネルギー損失のピーク値　青:コンクリート・土壌補正前、赤:コンクリート・土壌補正後　横軸:中性子検出器 ID　縦軸:エネルギー損失 [MeV]　エラーバーの示す誤差はランダウ分布のフィットに関する誤差のみであり、他の誤差を含まない。 39

6.1 プラスチックシンチレータ：直径:8.1mm, 高さ:4.5mm の円柱型、カウントレート:33cps 程度 41
6.2 光電面中心にセットしたシンチレータ 41
6.3 光電子増倍管のゲインテストのセットアップ　PMT:光電子増倍管　OSC:オシロスコープ 42
6.4 Voltage Divider：アノード間をシールドしていない金属線でつないでいることが確認できる 43
6.5 VETO 検出器部のテストの回路図 44
6.6 VETO 検出器部のテストのセットアップ (上面) 45
6.7 VETO 検出器部のテストのセットアップ (側面) 45
6.8 VETO 検出器部の時間分解能 46

6.9 光電子増倍管の特性曲線：横軸:印加電圧 [-V]　縦軸：宇宙線のカウントレート [cps]　赤：ch5、青：ch6、緑：ch1⊗ch2⊗ch5⊗ch6 47
6.10 中性子検出器 102 の波形：横軸 1 目盛 20ns、縦軸 1 目盛 50mV 48
6.11 中性子検出器 103 の波形：横軸 1 目盛 20ns、縦軸 1 目盛 50mV 48
6.12 中性子検出器 104 の波形：横軸 1 目盛 20ns、縦軸 1 目盛 500mV 49
6.13 中性子検出器 101 の波形 (a)：横軸 1 目盛 5ns、縦軸 1 目盛 CH1:50mV, CH2:1V 49
6.14 中性子検出器 101 の波形 (b)：横軸 1 目盛 5ns、縦軸 1 目盛 CH1:50mV, CH2:1V 49
6.15 中性子検出器 101 の波形 (c)：横軸 1 目盛 20ns、縦軸 1 目盛 5mV 49
6.16 シミュレーション評価実験のセットアップ (VETO' A)：奥が中性子検出器'、手前が VETO' A である。 51
6.17 シミュレーション評価実験のセットアップ (VETO' A)：中性子検出器'(奥) は R7724 をオプティカルグリスで接着。VETO' A(手前) は遮光。反対側は中性子検出器' は H6559 を、VETO' A は H7195 をオプティカルセメントで接着。 51
6.18 シミュレーション評価実験のセットアップ (VETO' A) top view：奥が中性子検出器'、手前が VETO' A である。両者の高さを揃えて 10cm 離し、平行にセットした。 52
6.19 シミュレーション評価実験のセットアップ (VETO' B)：奥が中性子検出器'、中央が VETO' B である。手前に見えている VETO' A はこのセットアップでは使用していない。 52
6.20 シミュレーション評価実験のセットアップ (VETO' B) top view: 奥が中性子検出器'、手前が VETO' B である。 53
6.21 シミュレーション評価実験のセットアップ (VETO' B) side view: 奥が中性子検出器'、手前が VETO' B である。この図では VETO' B のライトガイド・光電子増倍管を省略しシンチレータ部のみ描いている。 53
6.22 シミュレーション評価実験の回路図 54
6.23 上段:得られた ADC スペクトル 下段:上段をペデスタル補正後、ランダウ分布によりフィット。P2 がランダウピークの ch 数を示し、この場合 191ch である。 56
6.24 中性子検出器' の ADC スペクトル (青) シミュレーション結果 (赤線) 横軸:エネルギー損失 [MeV] 縦軸:カウント 58

A.1 EJ200 プラスチックシンチレータ：(上) 放出スペクトル (左) 各粒子に対する応答 (右) 各粒子のレンジ [21] 62
A.2 VETO 検出器部の光電子増倍管部分の構成と架台への保持方法：光電子増倍管部分の構成は中性子検出器部と共通である 63
A.3 光電子増倍管 R7724、Voltage Divider、ミューメタルシールド 64
A.4 軟鉄円筒形磁気シールド 64
A.5 R7724 の外形寸法とベースのダイアグラム [22] 65
A.6 R7724 の典型的なゲイン [22] 66
A.7 R7724 の典型的なスペクトル応答 [22] 66
A.8 ライトガイド、アルミナイズドマイラー、黒ビニールシート 66
A.9 NEBULA の正面ならびに側面図：「距離」と表記した長さを測定した 81
A.10 width,depth の設定 85
A.11 NEBULA の光電子増倍管 ID：数字は ID、黒字は既に設置済み、赤字はこれから設置予定であることを示す。 85

A.12 中性子検出器部の架台への保持方法 [17] . . . 92
A.13 長さ 16.5cm 程度のゴムシート：中性子検出器部上部のライトガイドの「首」の部分に巻く . . . 93
A.14 中性子検出器部上部固定具 (アルミ製) . . . 93
A.15 中性子検出器部上部固定具と架台上部の梁を L アングルにより固定する . . . 93
A.16 中性子検出器部上部ライトガイドにゴムシートを巻き固定具で固定する . . . 93
A.17 アルミのスポーク：光電子増倍管を支えるために用いる . . . 94
A.18 アルミ製の梁を L アングルにより架台下部の梁と固定している . . . 94
A.19 アルミ製の梁：デルリンの部品を介して中性子検出器部を支える . . . 94
A.20 左：光電子増倍管固定用リング　右：絶縁のためテープを巻いた状態 . . . 94
A.21 VETO 検出器部の架台への保持方法 [17] . . . 95
A.22 スペーサー：(1) 手前側の VETO が奥側の VETO と接触しないよう距離を保持する。(2) 上部ライドガイドと円筒棒の間の隙間を埋め安定性の向上を図る。以上の 2 つの目的で使用する。(2) の場合には写真のようにライドガイドと触れる面にゴムシートを巻き、金属部が直接ライドガイドに触れるのを防ぐ。 . . . 95
A.23 円筒棒 (ライトガイド支え)：ライドガイドを支える部分にはゴムシートを巻いて使用する . . . 95
A.24 VETO 検出器部固定用のアルミのプレート：ライトガイドへの直接の接触を防ぐためゴムシートを貼り付けている . . . 95
A.25 左：奥側の VETO 検出器部下部の固定方法　右：手前側の VETO 検出器部下部の固定方法。上部もほぼ同様の構成である。 . . . 96
A.26 コの字アングル：VETO 検出器部下部の軟鉄磁気シールドの固定に用いる . . . 96
A.27 左：奥側の VETO 用コの字アングル　右：手前側の VETO 用コの字アングル . . . 96
A.28 VETO 検出器下部：カプトン膜によりミューメタルシールドを覆う . . . 97
A.29 VETO 検出器下部：コの字アングルで軟鉄円筒型磁気シールドを固定する . . . 97
A.30 VETO 検出器下部：円筒棒とアルミのプレートでライトガイドを固定する . . . 97
A.31 VETO 検出器上部：スペーサーにより横方向でのぐらつきを抑える . . . 97
A.32 架台：架台転倒防止部品と突っ張りが共通のねじになっている . . . 98
A.33 架台と L アングル：中心部から設置していくと端では穴を使えない . . . 98
A.34 L アングル：1 台目のスタックの端のモジュールに用いる専用部品 (下部) . . . 99
A.35 L アングル：1 台目のスタックの端のモジュールに用いる専用部品 (上部) . . . 99
A.36 中性子検出器下部 PMT 固定用の棒：長さに余裕がない . . . 99
A.37 中性子検出器下部固定具：穴同士が隣接している . . . 99
B.1 1GeV 以上のエネルギーを持つ宇宙線の大気中での鉛直強度： 実線は近似式による再現。点は $E_\mu > 1\mathrm{GeV}$ の μ^- の測定値 [41] . . . 101
B.2 近似式による地表でのミューオンの運動量分布の再現 赤:$\theta = 0°$ 青:$\theta = 75°$ . . . 102
B.3 地表でのミューオンのエネルギー分布の観測値 [41] 黒:$\theta = 0°$ 白:$\theta = 75°$ . . . 103
B.4 地表でのミューオンの強度 . . . 103
B.5 rand によるエネルギー分布の再現：周期性が確認できる . . . 104
B.6 Mersenne twister によるエネルギー分布の再現：周期性は確認できない . . . 104
B.7 プラスチック中でのミューオンの阻止能：緑が (B.4.1) による出力結果、赤が E_NEW の出力結果である。2 つのグラフの重なった部分 (青) を右下に拡大して示した . . . 106
B.8 物質中でのエネルギー損失の分布 . . . 106
B.9 飛跡の長さ [cm] vs κ (エネルギー:1GeV) . . . 107

B.10 エネルギー vs κ (飛跡の長さ:14cm) . . . 108
B.11 エネルギー損失分布 (エネルギー:1GeV) 横軸:エネルギー損失 [MeV] 縦軸:カウント . . . 110
B.12 エネルギー損失分布 (エネルギー:1GeV) 横軸:エネルギー損失 [MeV] 縦軸:カウント . . . 111
B.13 Straggling prameter κ 分布 横軸:Straggling prameter κ 縦軸:カウント . . . 111
B.14 縦置きのシンチレータ 両端に光電子増倍管 (PMT) シンチレータ長:A 粒子の入射位置 (発光した位置):下から y . . . 113
B.15 from A to B . . . 114
B.16 from A to C . . . 114
B.17 from A to E . . . 114
B.18 from A to F . . . 115
B.19 from C to B . . . 115
B.20 from C to E . . . 115
B.21 from C to F . . . 115
B.22 from D to B . . . 115
B.23 from D to C . . . 115
B.24 from D to E . . . 116
B.25 from D to F . . . 116
B.26 from E to B . . . 116
B.27 from E to C . . . 116
B.28 from E to F . . . 116
B.29 A-B top view . . . 117
B.30 A-B side view . . . 117
B.31 A-C top view . . . 118
B.32 A-C side view . . . 118
B.33 A-E top view . . . 119
B.34 A-E side view . . . 119
B.35 A-F top view . . . 120
B.36 A-F side view . . . 120
B.37 C-B top view . . . 121
B.38 C-B side view . . . 121
B.39 C-E top view . . . 122
B.40 C-E side view . . . 122
B.41 C-F top view . . . 123
B.42 C-F side view . . . 123
B.43 D-B top view . . . 124
B.44 D-B side view . . . 124
B.45 D-C top view . . . 125
B.46 D-C side view . . . 125
B.47 D-E top view . . . 127
B.48 D-E side view . . . 127
B.49 D-F top view . . . 127
B.50 D-F side view . . . 127

B.51 E-B top view . . . 128
B.52 E-B side view . . . 128
B.53 E-C top view . . . 129
B.54 E-C side view . . . 129
B.55 E-F top view . . . 130
B.56 E-F side view . . . 130
B.57 対中性子検出器用の座標系：RIBF の建物を簡素な直方体で示した。 . . . 132
B.58 対 RIBF 用の反転座標系 . . . 133
B.59 反転座標系の RIBF 実験棟への適用 (B2F topview) . . . 135
B.60 反転座標系の RIBF 実験棟への適用 (BD sideview)：この定義では反転座標系の原点は空中に浮かぶことになる . . . 136
B.61 反転座標系の RIBF 実験棟への適用 (B9 sideview) . . . 137
B.62 反転座標系のテスト結果：上側の HistogramID=17 は共に緑は中性子検出器、横軸:方位角 φ、縦軸:天頂角 θ の到達粒子数を表す二次元ヒストグラムである。右側は粒子数に応じてカラー表示した。下側の HistogramID=49 はその射影で横軸:方位角 φ、縦軸:カウントである。 . . . 141
B.63 RIBF 実験棟での NEBULA の将来的な配置 (B2F topview) . . . 142
B.64 RIBF 実験棟での NEBULA の将来的な配置 (BD sideview) . . . 142
B.65 VETO 上での位置分布 上段:VETO 下段:VETO⊗ 中性子検出器 横軸: 水平方向位置 x[cm] 縦軸:鉛直方向位置 y[cm] . . . 144
B.66 VETO でのエネルギー損失分布 上段:VETO101 のエネルギー損失分布 緑:上部 PMT 青:下部 PMT 赤:相乗平均 横軸: エネルギー損失 [MeV] 縦軸:カウント 下段:VETO 全体のエネルギー損失分布 横軸: VETO ID 縦軸:エネルギー損失 [MeV] . . . 145
B.67 エネルギー損失分布 (相乗平均) VETO101〜104 横軸:中性子検出器 ID 縦軸:エネルギー損失 [MeV] 上段:NEBULA 背面 下段:NEBULA 前面 . . . 146
B.68 エネルギー損失分布 (相乗平均) VETO105〜112 横軸:中性子検出器 ID 縦軸:エネルギー損失 [MeV] 上段:NEBULA 背面 下段:NEBULA 前面 . . . 147
C.1 有機分子の π 電子エネルギー準位 . . . 151
C.2 (a)：1 個の中性子の散乱 (b)：2 個の中性子のイベント $v_1 \simeq v_2 > v_{12}$ となることを利用する . . . 152
C.3 ペデスタル . . . 154

表目次

2.1 SAMURAI の超伝導双極磁石の仕様 [15][16] 9
2.2 SAMURAI の目指す物理 [15] 9
2.3 大型中性子検出器の目標値 13

5.1 エネルギー損失のピーク値：第一列はコインシデンスの対象として選んだ VETO の ID を表す。表中の誤差はランダウ分布のフィットに関する誤差のみ表し、他の誤差を含んでいない。補正後の方が誤差が大きくなる傾向にあるのはコンクリート・土壌補正により粒子数すなわち統計が減っているためである。 40

6.1 16ch SCALER INPUT (VETO 検出器部のテスト) 46
6.2 Visual SCALER INPUT (VETO 検出器部のテスト) 46
6.3 光電子増倍管の印加電圧 (VETO テスト) 46
6.4 NEBULA での宇宙線のカウントレート：N⊗V は中性子検出器と VETO のコインシデンスを表す。 . 49
6.5 NEBULA の中性子検出器部とプロトタイプ検出器の比較 50
6.6 光電子増倍管の印加電圧 (シミュレーション評価実験) 51
6.7 SCALER INPUT (シミュレーション評価実験) 55
6.8 シミュレーション評価実験 カウントレート 55
6.9 カウントレートの比較 57

A.1 BC408 プラスチックシンチレータ 仕様 [21] 61
A.2 浜松ホトニクス R7724 仕様 [22] 64
A.3 浜松ホトニクス R7724 特性 (25 ℃)[22] 65
A.4 NEBULA のモジュール類の仕様 67
A.5 NEBULA のケーブル類の仕様 68
A.6 VME-V792 の仕様 [23] 69
A.7 V775AC の仕様 [24] 70
A.8 V895 の仕様 [25] 71
A.9 VME8100 の仕様 [26] 72
A.10 SY1527LC の仕様 [27] 73
A.11 A1535SN の仕様 [28] 73
A.12 N-RS 413 の仕様 [29] 74
A.13 N-TM 605 の仕様 [30] 74
A.14 SUHNER 製 SHV コネクタの仕様 [31] 74
A.15 SUHNER 製 BNC コネクタの仕様 [32] 75

A.16 RG_58_C/U の仕様 [33] . . . 75
A.17 RG_59_B/U の仕様 [34] . . . 76
A.18 RG_174_/U の仕様 [35] . . . 77
A.19 16ch,500ns VME ECL DELAY PRV-90 の仕様 [36] . . . 77
A.20 RPN-005-153 の仕様 [37] . . . 78
A.21 Quad Majority Logic Unit NIM MODEL 756 の仕様 [38] . . . 79
A.22 RPV-130 の仕様 [39] . . . 80
A.23 中性子検出器の位置 :架台左の柱の右側面から各中性子検出器の左端までの距離を表す . . . 81
A.24 各中性子検出器の左端同士の距離 . . . 82
A.25 中性子検出器のサイズ：width は横幅、depth は奥行きを表す (図 A.10) . . . 83
A.26 VETO の位置：架台左の柱の右側面から各 VETO 左端までの距離 (図 A.9) を表す . . . 84
A.27 VETO と中性子検出器の間の距離 . . . 84
A.28 ゲインのテスト結果： VETO 検出器部。100 番台は田中氏が [40]、300 番台は河田氏 ·Matta 氏が、400 番台は河田氏が行った。 . . . 86
A.29 ゲインのテスト結果：中性子検出器部 1 スタック目。100 番台は田中氏が行った。[40] . . . 87
A.30 ゲインのテスト結果：中性子検出器部 2 スタック目。300 番台は河田氏 ·Matta 氏が、400 番台は河田氏が行った。 . . . 88
A.31 ゲインのテスト結果：上記 10 本は予備とする。4490 は破損していた。 . . . 89
A.32 SY1527LC 上での HV channel 設定 NEUT . . . 90
A.33 SY1527LC 上での HV channel 設定 VETO . . . 91
B.1 ミューオンの近似式のパラメーター . . . 102
B.2 プラスチックの場合の密度効果補正のパラメーター . . . 105
B.3 中庸熱ポルトランドセメントの組成 [52] . . . 138
B.4 赤鉄鉱の諸性質 [55] . . . 139
B.5 コンクリートの配合 . . . 139
B.6 コンクリート全体の質量数 · 陽子数 · 密度 . . . 139
B.7 地殻の平均組成 [57] . . . 140
B.8 地殻の平均的な質量数 A, 電荷 Z, 密度 ρ . . . 140
B.9 ジオメトリの予測値：位置の定義はセクション A.2 に従う . . . 143
C.1 中性子 n と ^{1}H、^{12}C の反応 . . . 150
C.2 光電子増倍管 BA4469 の実験条件：「5+5」とは 5m のケーブル 2 本をつないで用いたことを表す。 . 153
C.3 光電子増倍管 BA3231 の実験条件 . . . 153

第 1 章

序

1.1 RIBF

理化学研究所 (埼玉県、和光市) において既存の加速器研究施設 RARF(**R**IKEN **A**ccelerator **R**esearch **F**acility) に加えて新たな施設 RIBF(**R**adio **I**sotope **B**eam **F**actory)[1][2] が 2007 年に稼働を始めた (図 1.1)。RIBF により新たな 3 基のリングサイクロトロン (fRC[*1], IRC[*2], SRC[*3]) と超伝導 RI ビーム生成分離装置 (BigRIPS)[3][4] が加わったことにより、これまでの加速器では到底得ることのできなかった核種を生成することができるようになった。従来施設で生成可能な 1 核子当たり 100MeV の不安定核ビームは質量数 50 以下に限られていたが、RIBF では質量数 250 まで、すなわちウランまでの全元素を 1 核子当たり 350MeV 程度のエネルギーまで加速できるようになった (図 1.2)。さらにそのビーム強度は 10^{13}cps と世界最大強度を誇る。

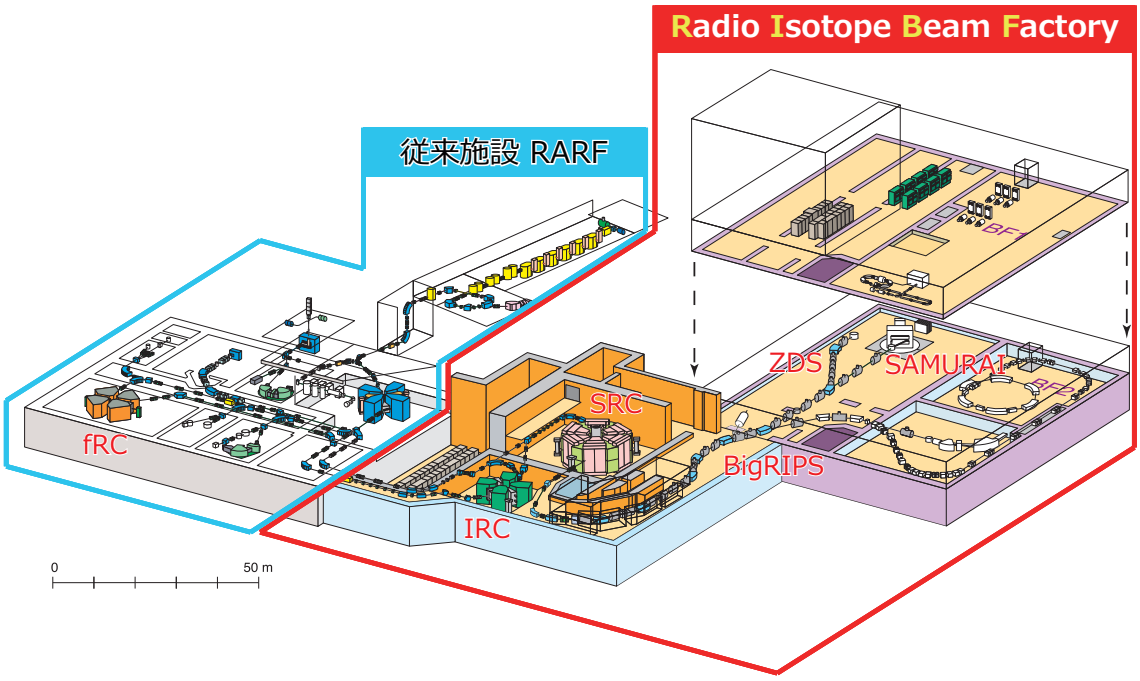


図 1.1: RIBF の鳥瞰図 [5]: 従来施設 (水色) に新たに RIBF(赤色) が加わった。

[*1] fRC : **f**ixed frequency **R**ing **C**yclotron　固定周波数型リングサイクロトロン
[*2] IRC : **I**ntermediate stage **R**ing **C**yclotron　中間段リングサイクロトロン
[*3] SRC : **S**uperconducting **R**ing **C**yclotron　超伝導リングサイクロトロン

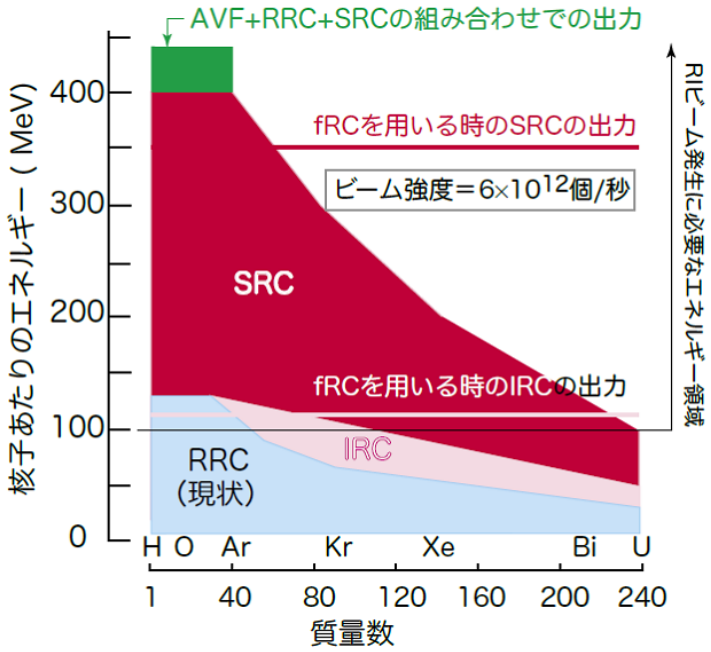


図 1.2: 各々の加速器で得られる不安定核ビームのエネルギー [5]

図 1.3 に従来施設と RIBF で生成可能な核種を核図表上に示した。理論的には 6000 個程度の原子核が存在すると予測されているが、このうち安定核が約 300 個、不安定核のうち既に発見されているものは約 2000 個である。RIBF では未だ発見されていない 1000 もの不安定核を発見できると期待されている。

1.2 中性子過剰領域の物理

中性子過剰領域の原子核では安定核近傍では見られない特異な構造が発見されている。それが中性子スキン核 [6] および中性子ハロー核 [7] である (図 1.4)。図 1.5 に中性子スキン核、図 1.6 に一中性子ハロー核、図 1.7 に二中性子ハロー核の模式図を示す。さらにこれらの原子核を理解するため、核図表を質量数 A が一定のラインで切ったときの陽子数・中性子数に応じて原子核の束縛エネルギーをプロットしたグラフ、安定核近傍・中性子過剰領域・さらに中性子ドリップライン近傍の原子核の核半径とポテンシャルエネルギー、密度の相関を表すグラフを図 1.8 に示す。

安定核近傍の原子核では陽子数と中性子数がほぼ同じ (図 1.8(a)) であるが、中性子過剰領域の原子核では陽子数より中性子数の方が多くなり図 1.8(b) のようにその差からコアとなる部分の周りにまるで” 皮 (スキン)” のように過剰な多数の中性子が取り囲んでいるような構造が見られることがある。このような原子核を中性子スキン核と呼ぶ。

さらに束縛限界の中性子ドリップライン近傍の原子核では通常の核密度をもつコアの周りに一個ないし二個の中性子が広がる構造が見つかっており、これを中性子ハロー核と呼ぶ。中性子が束縛限界の弱束縛状態に達したとき、量子力学的トンネル効果により確率密度関数が外に染み出し、薄く広がることでまるでかさ (ハロー) をまとったおぼろ月のような構造になると考えられている (図 1.8(c))。しかし、比較的質量の小さな領域で確認されているハロー構造がさらに質量の大きな領域でも現れるのか。もし、ハロー構造が見出されるのならばどの原子核でハローが形成されるのか。さらにどのようなメカニズムでハロー構造が発達するのかといった点は未だ正確に理解されていない。

実験も困難を極め、この 10 年近く新たなハロー核は発見されておらず ^{19}C が発見された中で最も重いハロー核であった。加えて、これ以上重い原子核ではハロー構造は形成されにくくなるという説も存在し、より重いハロー核の発見が待ち望まれていた。

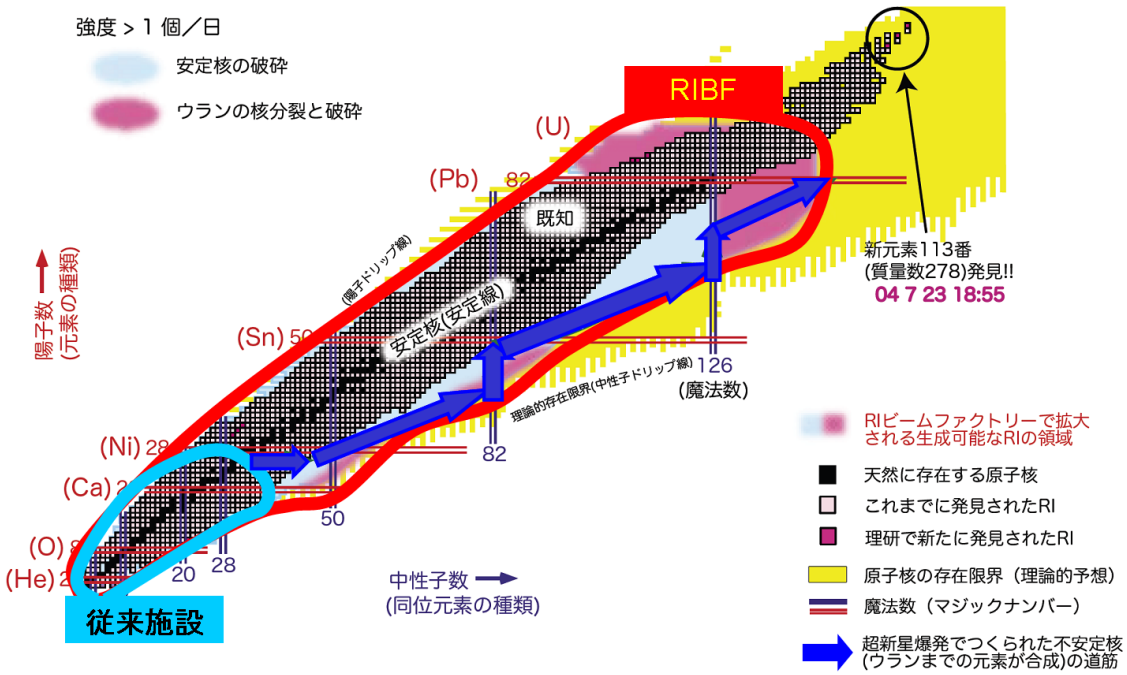


図 1.3: 核図表 [5]: 水色の領域が従来施設で生成可能な領域、赤色の領域が RIBF で生成可能な領域である。青の矢印は r-プロセスを示す。

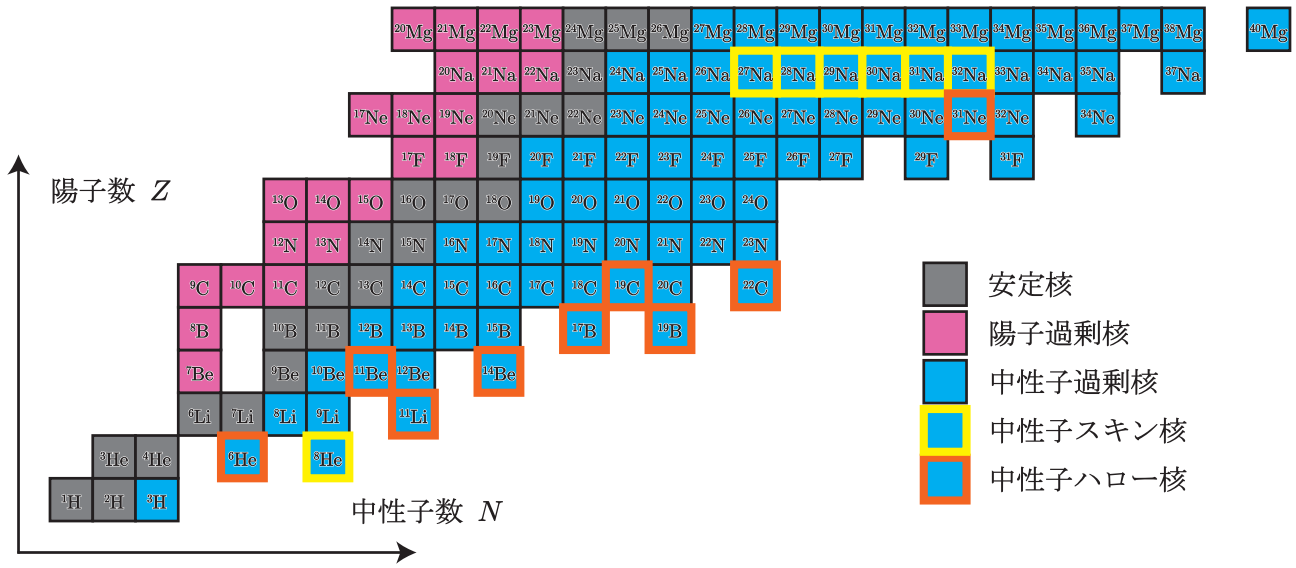


図 1.4: Mg までの核図表：黒は安定核、赤は陽子過剰核、青は中性子過剰核を表す。黄、橙はそれぞれ現在知られている中性子スキン核および中性子ハロー核を表す。

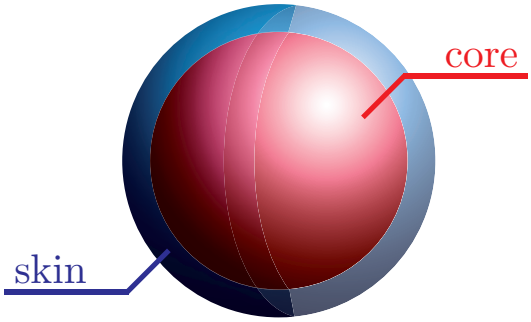


図 1.5: 中性子スキン核の模式図

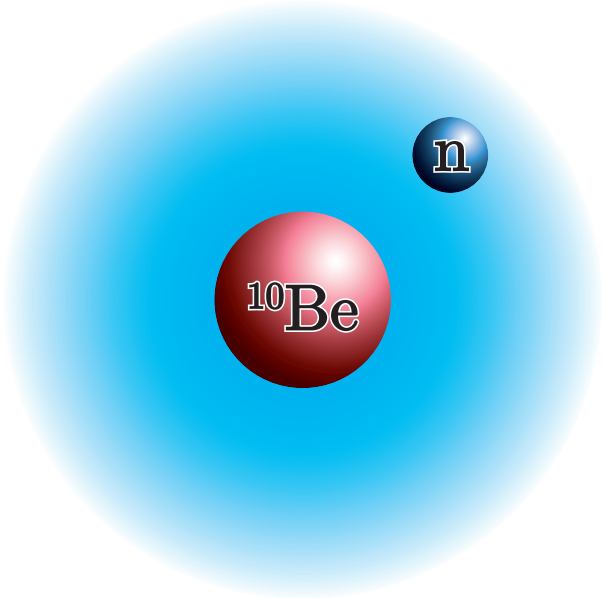


図 1.6: 一中性子ハロー核 ^{11}Be： コアの ^{10}Be の周りに 1 個の中性子が薄く広がっている。

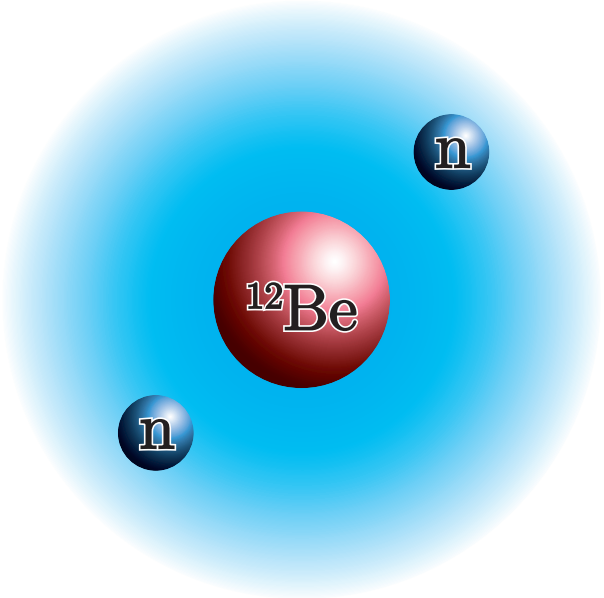


図 1.7: 二中性子ハロー核 ^{14}Be： コアの ^{12}Be の周りに 2 個の中性子が薄く広がっている。

このような状況の中、2008 年に中村氏らにより RIBF において ^{31}Ne のクーロン分解反応の実験[*4]が行われた。この実験により ^{31}Ne のクーロン分解の反応断面積が 540(70)mb と非常に大きく、ソフトダイポール励起が起こっていることが確認された。このことから ^{31}Ne がハロー構造を持つことが明らかになった [8][9]。

この実験の成功の背景には RIBF の存在が大きい。1996 年に櫻井氏 (理化学研究所) らが従来施設 RARF の入射核破砕片分離装置 RIPS[*5][10] において初めて ^{31}Ne を生成、識別したとき 4 日間の測定で ^{31}Ne と識別できたのは僅か 23 イベント ∼5 count/day であった[*6][11]。一方で今回の RIBF における実験では約 5 count/sec であったので、実に 10^5 倍ものビーム強度を得たことになる。

さらにこの実験では ^{31}Ne の他にも ^{22}C についてもハロー構造を持つことが明らかにされた [9]。この実験以外でも RIBF では核子当たり 345MeV の ^{238}U ビームを用いて新核種 ^{125}Pd と ^{126}Pd の生成、識別に成功 [12] し、Ne のア

[*4] Day-One Campaign(RIBF における物理実験としては初の実験) の一つ
[*5] RIPS : **RI**KEN **P**rojectile-Fragment **S**eparator
[*6] この実験では 80 AMeV の ^{50}Ti ビームを ^{181}Ta ターゲットに入射させた。その結果 ^{31}Ne の他にも ^{37}Mg を初めて生成、識別することに成功した。^{37}Mg のイベント数は 4 日間で 3 イベントであった。

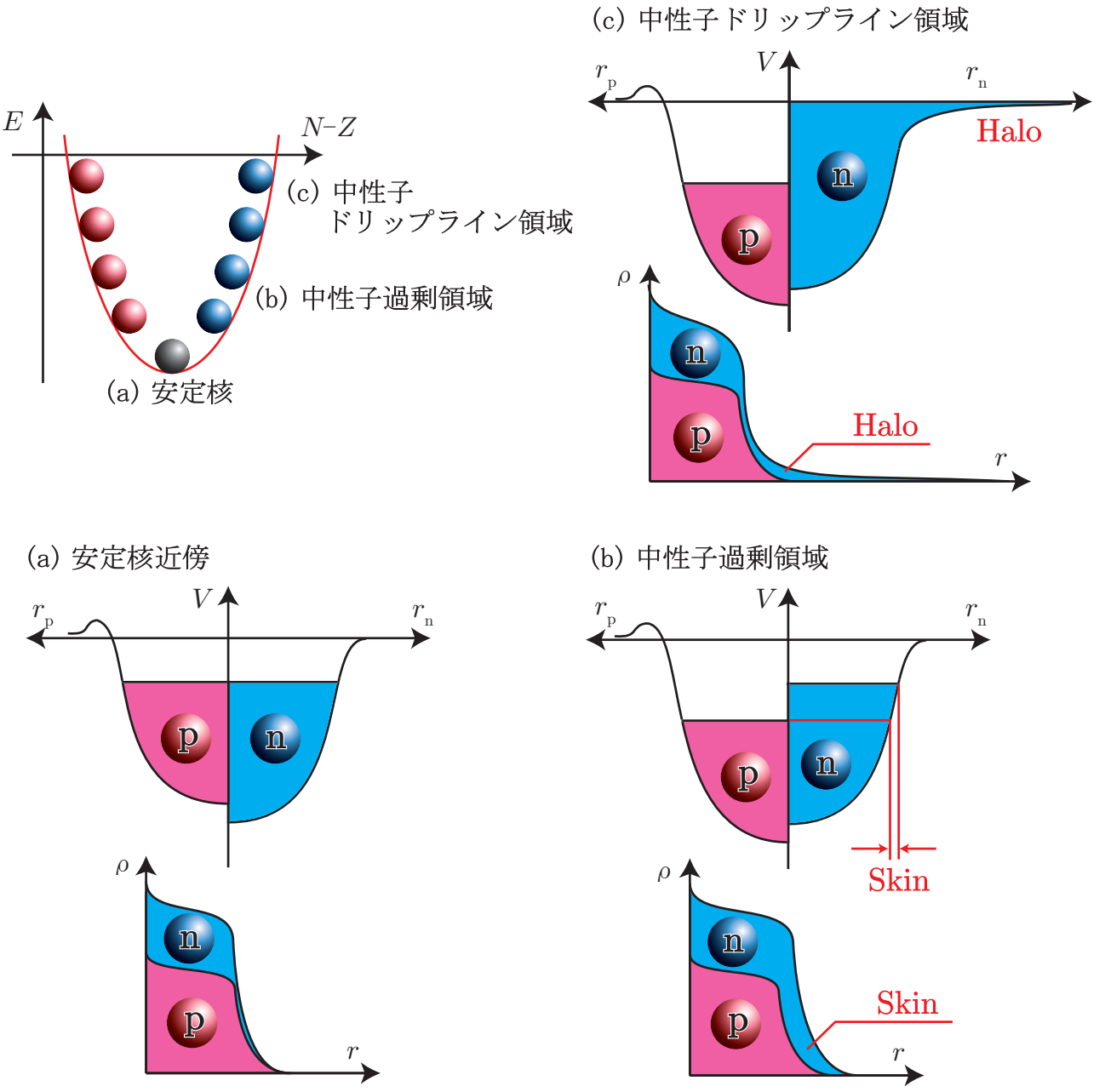


図 1.8: (a) 安定核近傍、(b) 中性子過剰領域、(c) 中性子ドリップライン近傍でのポテンシャルと陽子 · 中性子の密度分布

イソトープにおいては少なくとも N=22 まで魔法数の消失 (island of inversion) が起きていることが明らかにされる [13] など、RIBF の登場によってこれまでほぼ不可能であったより重い中性子過剰な原子核での研究が可能になったのである。

前述の中性子スキン核や中性子ハロー核などのエキゾチック核、魔法数の消失や新魔法数の出現など魔法数の変化の他にも、振動の復元力が弱く励起エネルギーが低くなることに起因する通常の巨大共鳴とは別種の陽子-中性子間相対振動モード (ピグミー共鳴)、同種粒子である中性子同士がペアを作るダイニュートロンなどの安定核では見られない特異な現象が中性子過剰核において見つかっている。また、天体中での ^{56}Fe 以降の重元素の爆発的合成過程 (r-プロセ

ス) は中性子ドリップライン近傍を経由すると考えられておりこれらの研究が盛んに進められている。

そして、RIBF の稼働開始に伴いこれまで研究不可能であったより重い中性子過剰領域での実験が可能になったことで、実験装置のアップグレードが不可欠なものとなっている。

本論文では、このような状況の中開発を行っている大型中性子検出器開発の目的について第 2 章で述べた後、続く第 3 章では大型中性子検出器の概要と現在の開発状況について述べる。第 4 章では大型中性子検出器の運用のために開発したシミュレーターの目的と概略について述べ、第 5 章ではそのシミュレーターを使って宇宙線のシミュレーションを行った結果について考察を行う。第 6 章では大型中性子検出器開発のために行った実験とシミュレーターの評価実験について述べる。最後に第 7 章でまとめと今後の展望について述べる。

第 2 章

大型中性子検出器開発の目的

2.1 不変質量法 Invariant mass method

安定核とその近傍の原子核の構造を調べる際、その励起状態を探るのに用いられる方法がインビーム γ 分光法 (In-beam γ spectroscopy) である。安定核とその近傍では励起準位が束縛状態であるため、励起準位から基底状態へ遷移する際に放出される γ 線を測定することによりその励起状態を同定することができる。一方で、ドリップライン近傍の原子核では励起状態が非束縛状態であるため γ 線が放出されず、この方法を適用することができない。

ドリップライン近傍の原子核の構造を調べる際の有効な方法として不変質量法がある。不変質量法は非束縛な励起準位の測定に用いられる方法の 1 つであり、放出粒子の運動量の測定によって励起エネルギーを求めることができる。そのために二次ビームの運動量の広がりや入射角度の広がりに依存しない高いエネルギー分解能を持つことが不変質量法の利点として挙げられる。

ここでは、不変質量法の例として佐藤氏らが理化学研究所の従来施設 RARF のフラグメントセパレーター RIPS を用いて行った ^{19}C の非弾性散乱 [14] を取り上げる。^{19}C は中心に ^{18}C、その回りに 1 個の中性子が弱く結合している一中性子ハロー核である。不安定核ビームとして ^{19}C を生成し、ターゲット (この実験では陽子) に当てると強い相互作用により ^{18}C と 1 個の中性子へと崩壊する。崩壊後の ^{18}C の静止質量を $m_{^{18}C}$、運動量を $\boldsymbol{P}_{^{18}C}$、エネルギーを $E_{^{18}C}$ とし、中性子も同様に m_n、$\boldsymbol{P}_n$、E_n とすると、励起状態の質量 M は

$$M = \sqrt{(E_{^{18}C} + E_n)^2 - (\boldsymbol{P}_{^{18}C} + \boldsymbol{P}_n)^2} \tag{2.1.1}$$

と書ける。この M を不変質量と呼ぶ。この不変質量から崩壊後の粒子の静止質量を引いた値を相対エネルギー E_{rel} と呼び、

$$E_{rel} = M - (m_{^{18}C} + m_n) \tag{2.1.2}$$

と表せる。このとき、^{19}C の一中性子分離エネルギー S_n は

$$S_n = (m_{^{18}C} + m_n) - m_{^{19}C} \tag{2.1.3}$$

となる。これら S_n,E_x より励起エネルギー E_x は

$$E_x = E_{rel} + S_n \tag{2.1.4}$$

と求めることができる。このように崩壊後の全粒子の運動量を測定して E_x を求める方法を不変質量法と呼ぶ。

佐藤氏らの実験では不変質量法を用いて相対エネルギー $E_{rel} = 0.88(1)$MeV より $E_x = 1.46(10)$MeV の励起状態をはじめて観測した。

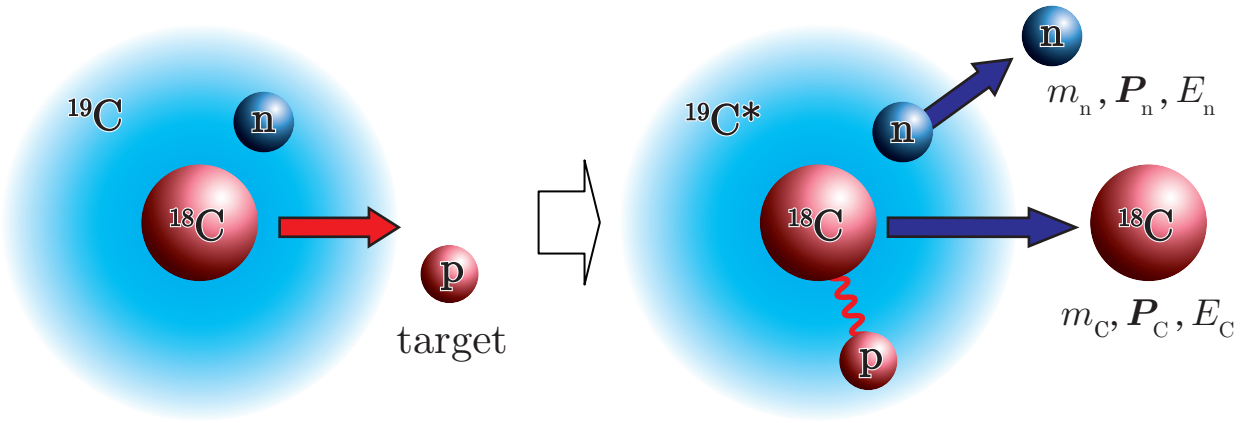


図 2.1: 不変質量法の例：^{19}C のクーロン分解

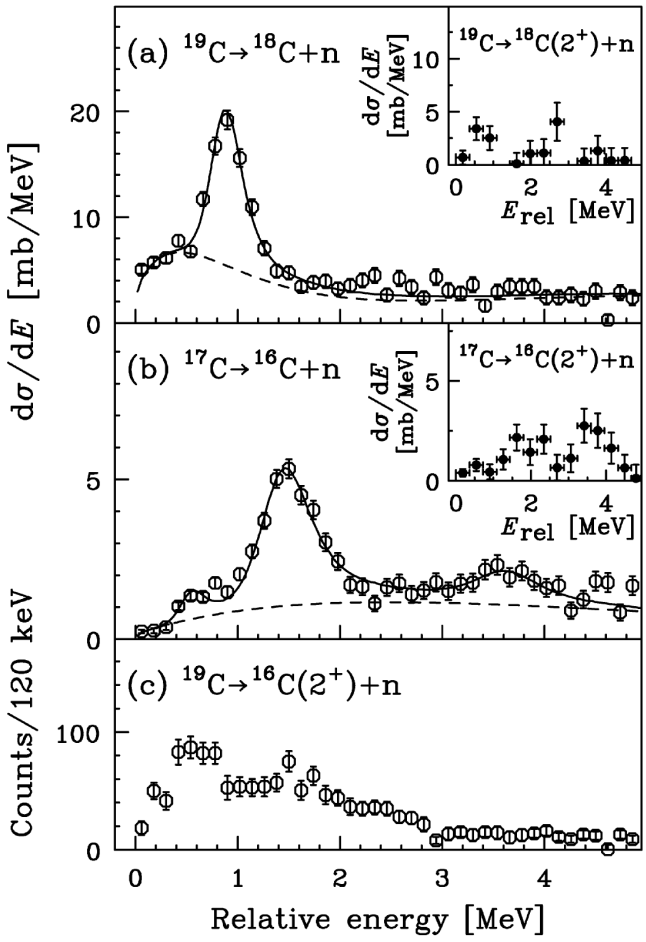


図 2.2: 相対エネルギーのスペクトル [14]：(a)^{19}C → ^{18}C + n において E_{rel} のピークが確認できる。

2.2 SAMURAI

SAMURAI(**S**uperconducting **A**nalyzer for **M**ulti-particle from **R**adioactive **I**sotopebeam)[15][16] は超伝導双極電磁石によりターゲットと反応して生成された破砕片 (fragment) を分離、後方に設置された各種検出器によって全粒子を測定する大立体角多種粒子測定装置である。RIBF 計画の PHASE-II[*1]でビームライン下流 (図 2.5) に建造される RIBF の基幹設備となる。複数粒子の同時検出により運動学的に完全な測定を行うことを主たる目的として設計されており、双極磁石の大きなギャップにより様々な測定が可能となる。

以下に SAMURAI の特徴を記す。

- H タイプ超伝導磁石[*2]
- Field Integral : 7Tm　これにより磁気硬度の分解能は 1/700(rms)、A =100 までの粒子識別が可能となる
- 鉛直方向に 80cm のギャップ。これにより高速中性子に対する鉛直方向 ±5° のアクセプタンスを実現
- 多様な実験のセットアップに対応するため、0° から 180° まで回転可能なベースを持つ (図 2.4)

表 2.1 には SAMURAI の超伝導双極磁石の仕様、表 2.2 には SAMURAI の目指す物理をその手法ごとに示す。

直径	2m
外形寸法 (ヨーク含む)	6.8m(幅)×4.6m(高さ)×3m(奥行き)
最大磁場	3T@3.6MAT
貯蔵エネルギー	28MJ
膨張力	200t/m
総重量	650t

表 2.1: SAMURAI の超伝導双極磁石の仕様 [15][16]

手法	反応の種類	物理的対象	観測量
クーロン分解反応	ソフトダイポール励起	一粒子軌道	不変質量
	巨大共鳴	集団運動	
	放射捕獲反応	天体核物理	
陽子と軽い標的	弾性/非弾性 (p,p),(p,p')	密度分布	欠損エネルギー
	ノックアウト (p,pN)	一粒子軌道	崩壊タギング
偏極 d ビーム	(d,d)	2-3 核子力	偏極
誘導反応	(d,p)	短距離相関	
4π 測定		状態方程式	パイオン

表 2.2: SAMURAI の目指す物理 [15]

建造開始は 2009 年 10 月、建造終了は早くて 2011 年、SAMURAI での最初の実験は 2011 年夏を予定しており、各

[*1] RIBF 計画は PHASE-I と PHASE-II の 2 段階に分かれる。PHASE-I は既に完了し、fRC、IRC、SRC の新たな加速器と BigRIPS、ZeroDegree の 2 つの新たなスペクトロメータが加わった。現在 PHASE-II が進行中で SHARAQ(既に稼働を開始),SAMURAI,SCRIT,Rare RI-Ring,SLOWRI などが建造される。

[*2] 単純な構造になることを目的として採用

種検出器群の開発も並行して行われている。SAMURAI の主な目的の一つである中性子過剰核のクーロン分解反応においては高速中性子の検出により不変質量法を用いた粒子の完全な測定が不可欠である。この高速中性子の検出を担うのが本研究のテーマである大型中性子検出器 NEBULA(**NE**utron-detection system for **B**reakup of **U**nstable-Nuclei with **L**arge **A**cceptance) である。

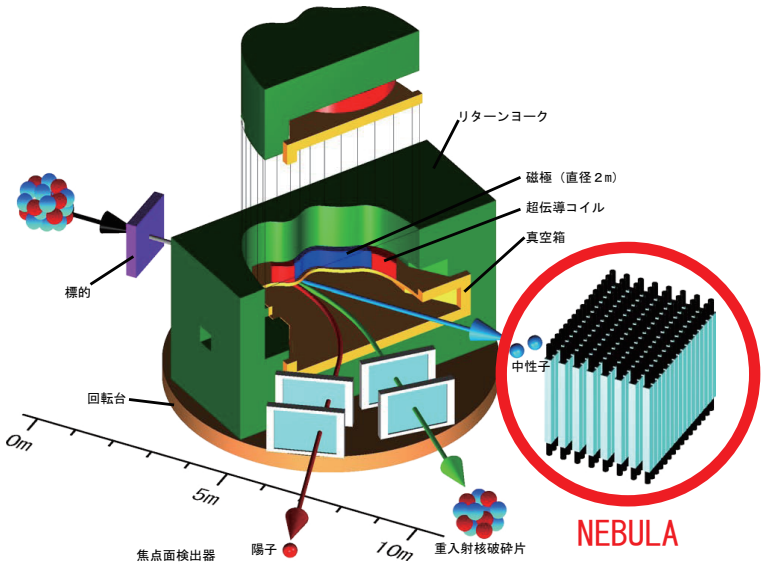


図 2.3: SAMURAI[5]

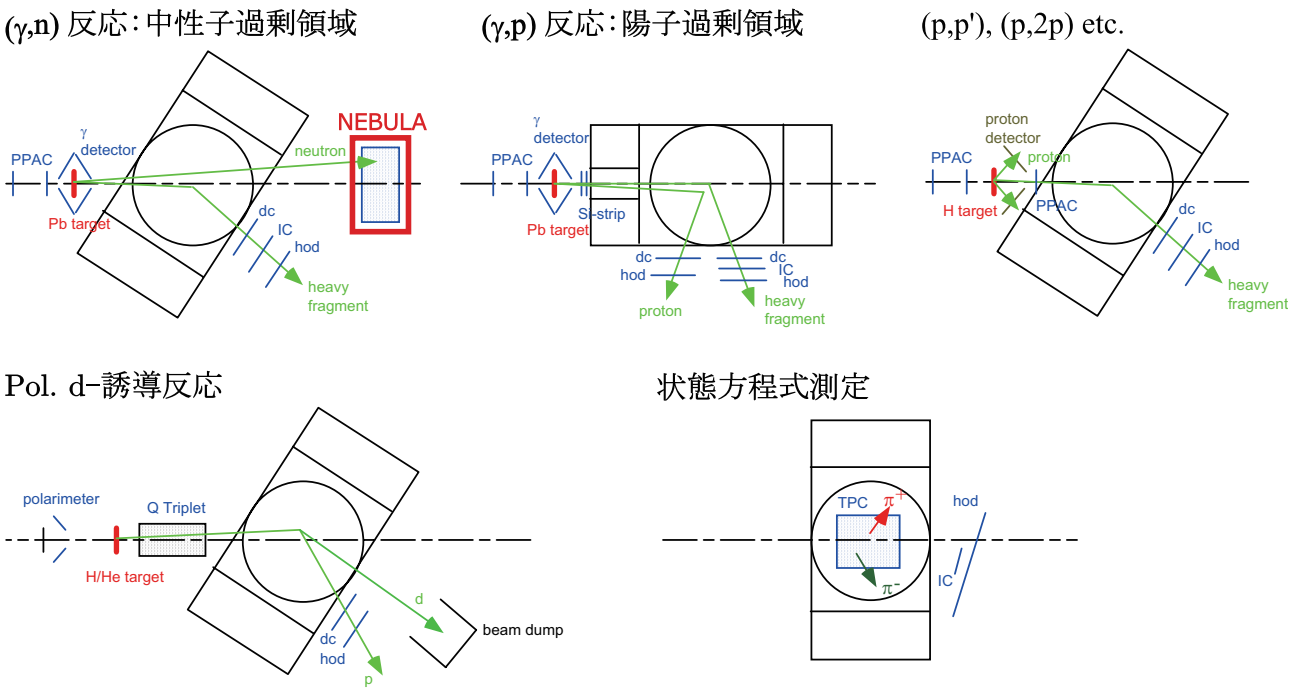


図 2.4: SAMURAI の回転可能な双極磁石 [15]：測定の種類に応じて設定を変えることができる。

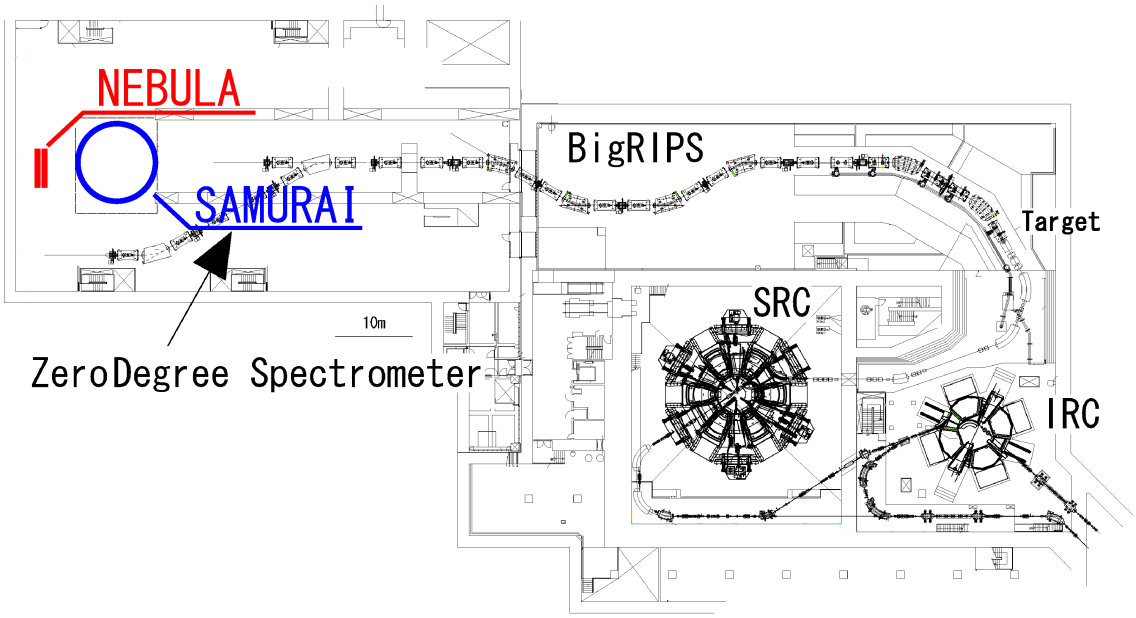


図 2.5: RIBF のビームライン：円の位置に SAMURAI が作られる。

2.3　SAMURAI でのセットアップ

NEBULA は SAMURAI の電磁石ピット下流に配置される (図 2.6、2.7)。

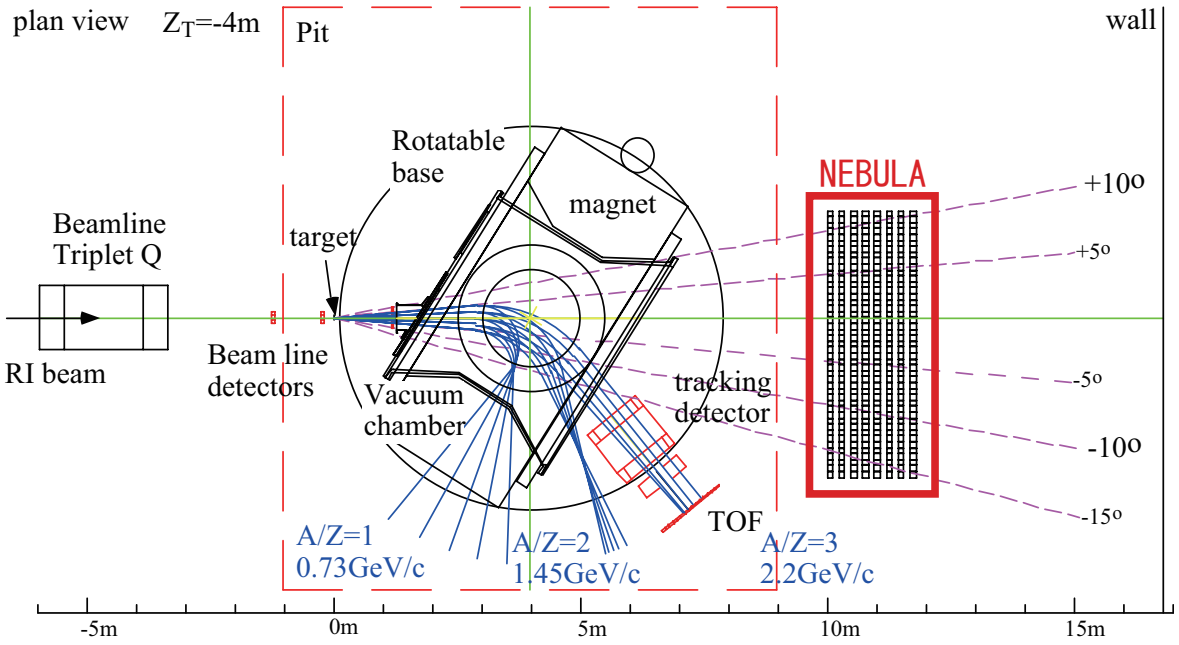


図 2.6: SAMURAI でのセットアップ (top view)[15]

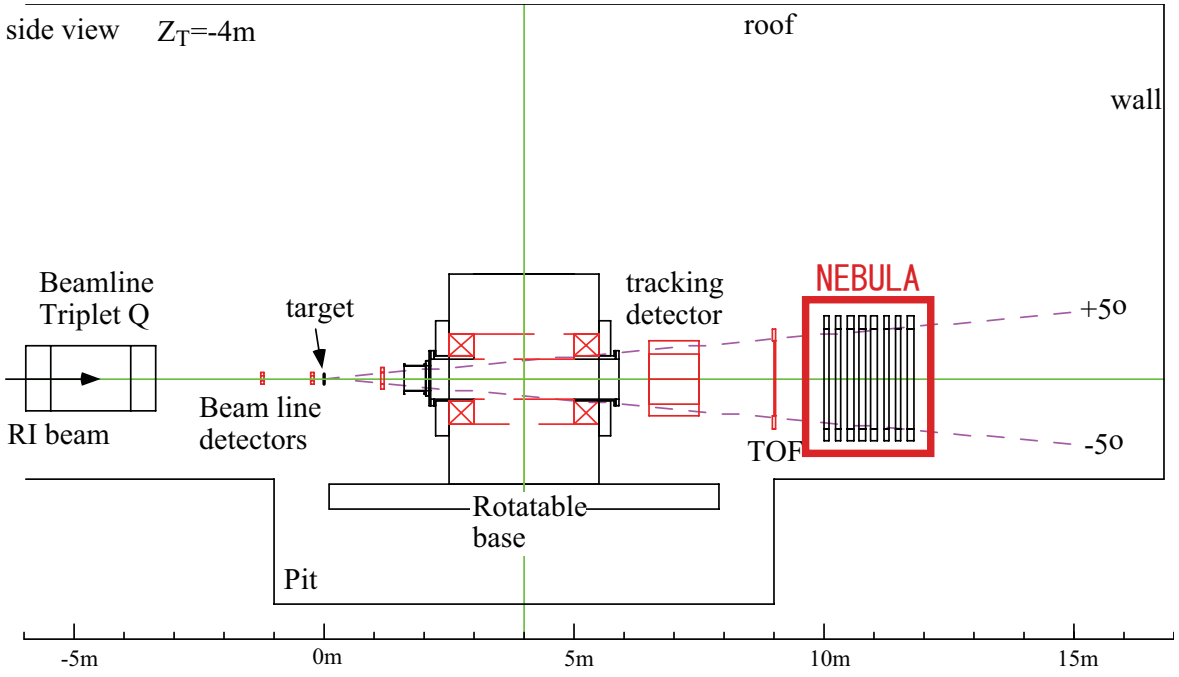


図 2.7: SAMURAI でのセットアップ (side view)[15]

2.4 大型中性子検出器の目標

大型中性子検出器の目標値を表 2.3 に示す。

大きな角度アクセプタンス	水平方向に $\pm 10^\circ$	※相対エネルギーが 10MeV 程度の中性子過剰な不安定核の
高い角度分解能	$\sim$ mrad	分解反応により放出される中性子を検出するのに不可欠である。
大きな速度アクセプタンス	$0.62 \pm 15\%$	※不変質量法における励起エネルギーのスペクトルの観測のため。
高い速度分解能	$\sigma_\beta/\beta \sim 0.5$ %	
高い検出効率	従来の 20% $\rightarrow$ 70%	
同時に放出される複数個の中性子 (multi-neutron coincidence events) の検出効率の向上		
精細化されたシンチレータによる位置分解能の向上		

表 2.3: 大型中性子検出器の目標値

第 3 章

大型中性子検出器の概要

3.1 NEBULA の構成要素

大型中性子検出器 NEBULA は最終的に合計 4 つのスタックから構成される。現在はその 1 つ目のスタックを開発中である。

1 つのスタックは大別して中性子検出器部、VETO 検出器部、架台、エレクトロニクス部の 4 つから成る。以下それらを概説する。

3.1.1 中性子検出器部

不安定核二次反応により生じた高速中性子の飛行時間並びにその位置を測定する検出器である。

分割されたモジュールのどの ID にヒットしたかによって水平方向の位置 x およびビーム軸方向の位置 z が測定できる。さらに、上下の光電子増倍管の時間差により鉛直方向の位置 y が測定できる。この位置情報と飛行時間 (TOF[*1]) により不安定核二次反応で放出された中性子の運動量ベクトル $\boldsymbol{P}_{\mathrm{n}}$ を決定することができる。

中性子検出器部は 1 つのスタックにつき 2 層からなる。その 1 層は水平方向に 30 のモジュールにより構成される。1 つのモジュールは直方体のプラスチックシンチレータとその両端にライトガイドを介して接着された 2 個の光電子増倍管からなる。中性子検出器部全体の有感体積は水平方向 360cm、鉛直方向 180cm、奥行き (ビーム軸) 方向が 24cm である。

以下、各々の構成要素について述べる。

プラスチックシンチレータ

シンチレータには 12cm(厚み)×12cm(幅)×180cm(高さ) の直方体のプラスチックシンチレータ BC-408 を使用している[*2]。

ライトガイド

ライトガイドにはルサイトの UVT[*3]有りの角錐台型を使用している。田中氏の研究 [18] により、高い時間分解能が得られるこの仕様が採用された。

[*1] TOF : **T**ime **O**f **F**light

[*2] 詳細は A.1.1 参照。

[*3] Ultra-Violet Transmitting : 紫外線透過。UVT 有りの場合紫外線を透過する。逆に UVT 無しの場合紫外線を透過しない。

光電子増倍管

光電子増倍管には浜松ホトニクス R7724 を使用している[*4]。田中氏の研究 [19] により、時間分解能が高く、比較的安価なこの光電子増倍管を使用することが決定された。

3.1.2　VETO 検出器部

重イオン核反応により生成されたフラグメントのうち荷電粒子は超伝導磁石により曲げられ陽子検出器や重イオン検出器で検出される。そのため NEBULA では磁石により曲げられることのない中性子のみを検出することになる。しかし、実際には磁石により曲げきれず直進する荷電粒子や壁に当たって反射する粒子なども存在する。これらの荷電粒子を排除するため中性子検出器部前面に VETO 検出器部が設置される。VETO に入射した荷電粒子により VETO 信号を作り、このイベントを排除する (VETO は厚さ 1cm と薄いため中性子は反応せず、検出されたイベントは全て荷電粒子によるものと判断する)。一方で VETO 信号が作られなかったイベントを中性子検出イベントと判断する。

現在理化学研究所の従来施設 RARF の RIPS で使われている同様の (より小型の) 中性子検出器は 2 スタックからなるが、VETO は 1 スタック目の前面にのみ設置されている。この場合 1 スタック目の中性子検出器中で起きた反応によって陽子が放出されることがあり、そのまま 2 スタック目の中性子検出器で検出されてしまうイベントが存在する。NEBULA ではこのようなイベントを排除するため全てのスタックの前面に VETO が設置される (図 3.5)。

VETO 検出器部は 1 つのスタックにつき 1 層、水平方向 12 のモジュールにより構成される。1 つのモジュールは 1cm(厚み)×32cm(幅)×190cm(高さ) のプラスチックシンチレータの両端にライトガイドを介して 2 個の光電子増倍管を接着したものである。

VETO 検出器部全体の有感面積は水平方向 373cm、鉛直方向 190cm である。

プラスチックシンチレータ · ライトガイド · 光電子増倍管

プラスチックシンチレータおよびライトガイドは大きさ以外は中性子検出器部と同一の仕様である。また、光電子増倍管は中性子検出器部と同一の仕様である。

3.1.3　エレクトロニクス部

中性子検出器部および VETO 検出器部の光電子増倍管からの高速パルス信号の処理を行い、時間および電荷パルス積分値（エネルギー）情報を読み出す。NEBULA のトリガーを生成し、NEBULA で独立してデータ収集を行えるようにする[*5]。

[*4] 詳細は A.1.2 参照。
[*5] 詳細は A.1.5 参照。

図 3.1: NEBULA の概観 (1 スタック目)：まだ右半分の中性子検出器部とエレクトロニクス部は設置されていない。

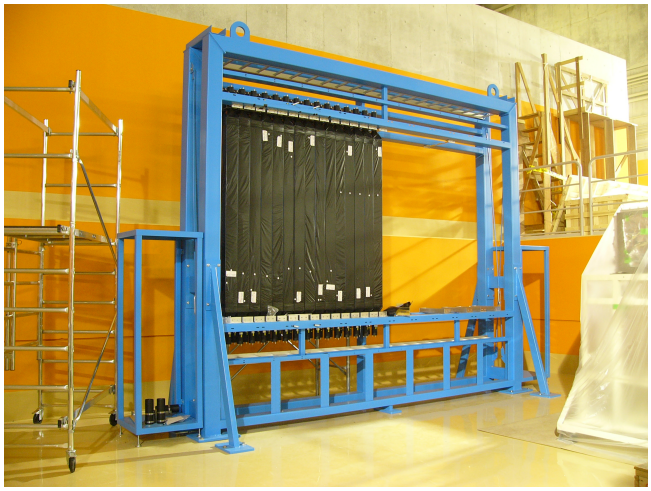


図 3.2: NEBULA の概観 (1 スタック目)： VETO 検出器部を外した状態

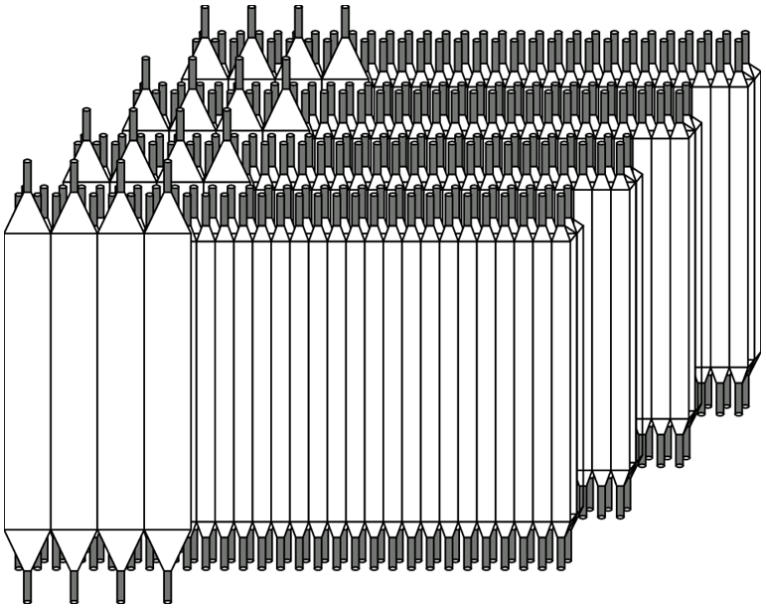


図 3.3: NEBULA：VETO 検出器部と中性子検出器部

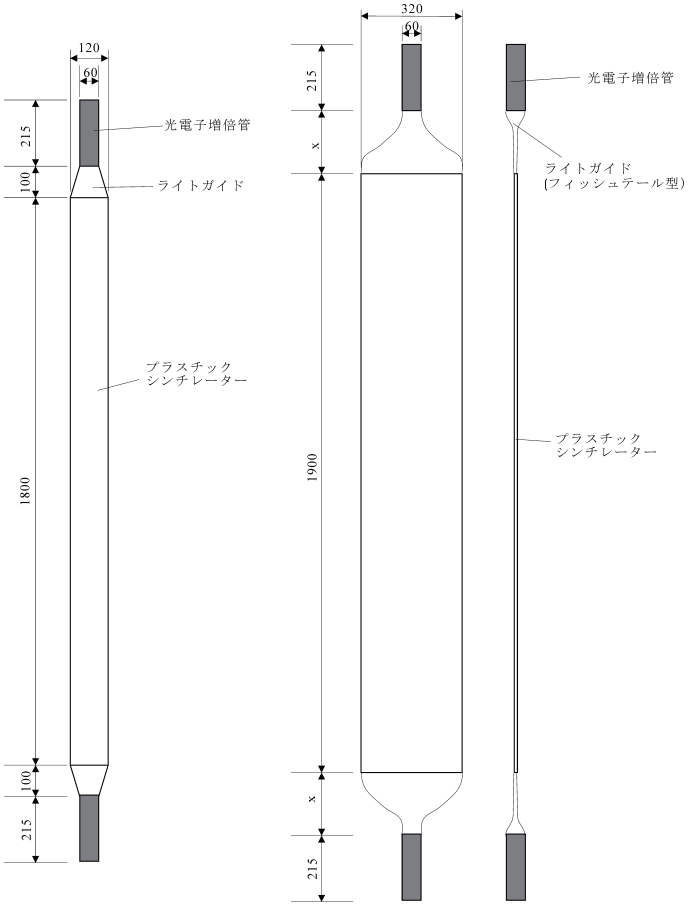


図 3.4: (左)：中性子検出器部の 1 モジュール (右)：VETO 検出器部の 1 モジュール [17]

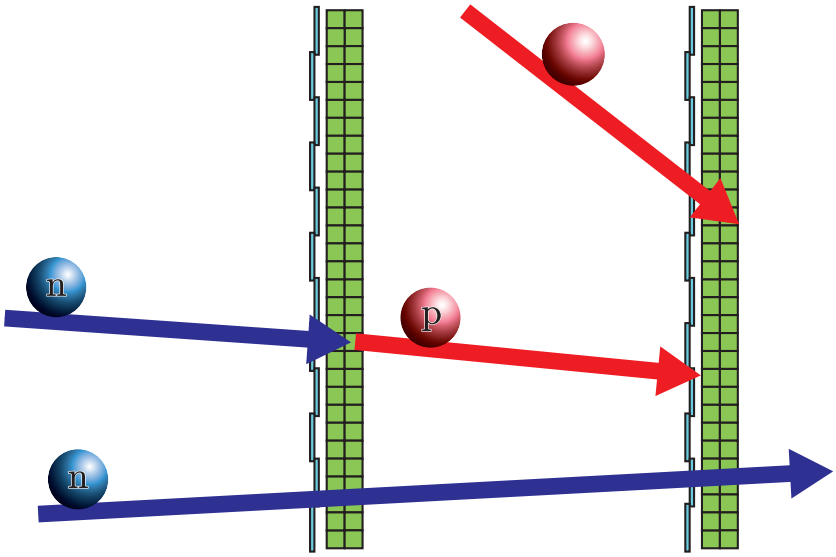


図 3.5: VETO：壁で反射した荷電粒子 (上段) や前方のスタックで発生した陽子 (中段) などを排除し、中性子のみを検出する。

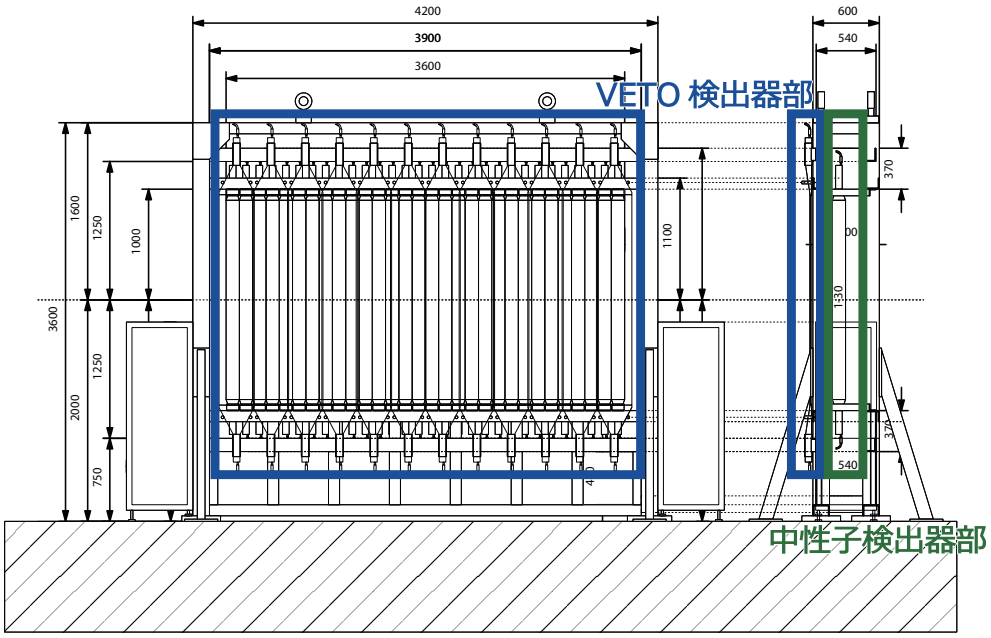


図 3.6: NEBULA の正面ならびに側面図：青で囲った部分が VETO 検出器部、緑で囲った部分が中性子検出器部である。VETO は荷電粒子排除のため中性子検出器部の前面に配置される。

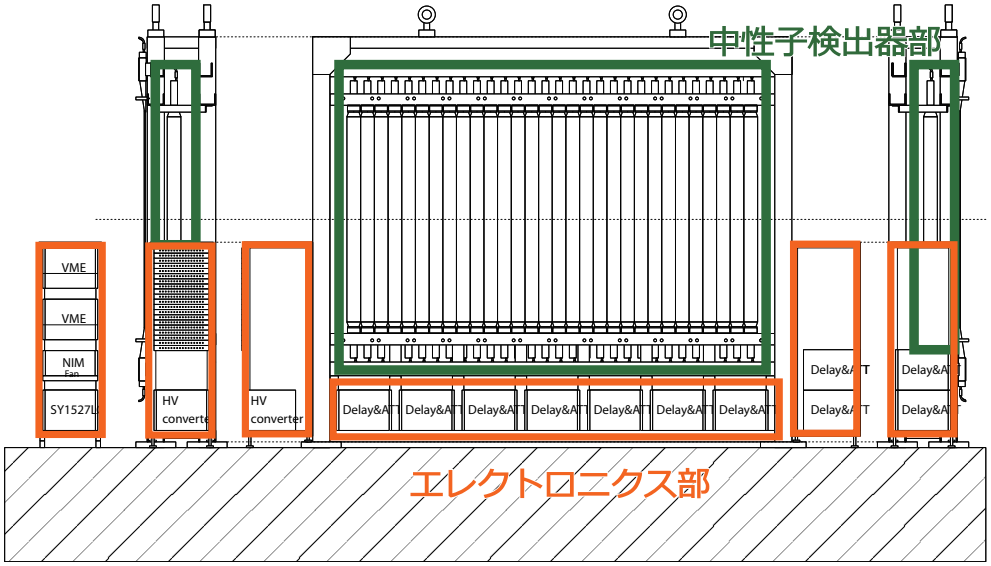


図 3.7: NEBULA の背面ならびに側面図 :緑で囲った部分が中性子検出器部、橙で囲った部分がエレクトロニクス部である。

3.2　ID の設定

図 3.8 に NEBULA の ID 設定を示す。次章以降、中性子検出器部や VETO 検出器部の ID について言及するとき、この ID 設定を元にして述べる。

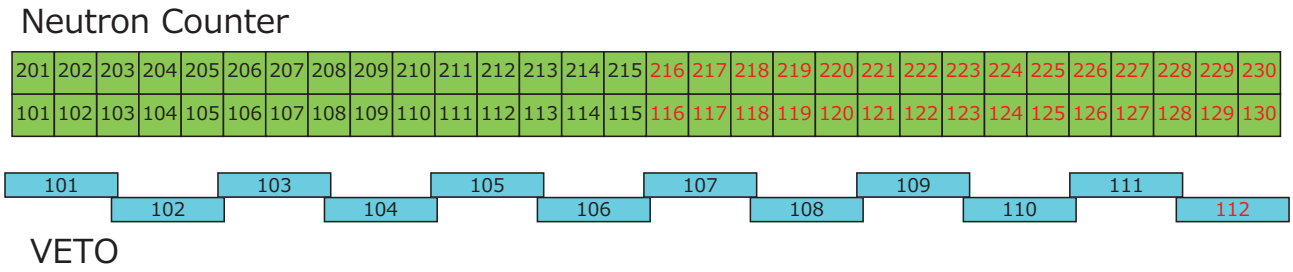


図 3.8: NEBULA の ID：数字は ID、黒字は既に設置済み、赤字はこれから設置予定であることを示す。

3.3　現在の開発状況

現在の開発状況は以下の通りである。

- 1 台目のスタックの中性子検出器部 60 モジュールのうち左側半分 30 モジュールを設置完了
- 1 台目のスタックの VETO 検出器部 12 モジュールのうち左側 11 モジュールを設置完了
- エレクトロニクス部については電源ユニットを設置。中性子検出器部への配線も完了
- 中性子検出器部の信号用 BNC ケーブルと光電子増倍管の接続完了

第 4 章

シミュレーターの開発

4.1 目的

NEBULA の実際の運用においてはエネルギー較正やスルー補正などキャリブレーションを行う必要がある。このキャリブレーションの為、宇宙線が中性子検出器に入射した際のエネルギー損失の分布を得るシミュレーターを開発した。

4.2 概略

VETO の信号をスタートトリガーとして VETO と中性子検出器のコインシデンスの条件の下、宇宙線の中性子検出器中でのエネルギー損失 (パルスハイトに相当する) をシミュレートした。シミュレーターの概要を以下に示す[*1]。

- 地上でのミューオンの分布を再現
- RIBF 実験棟の構造をラフに再現 (図 4.2)
- NEBULA のジオメトリ情報に基づき VETO・中性子検出器にヒットするかどうかを判定
- 中性子検出器中での飛跡の長さを計算 (図 4.3)
- エネルギー損失を計算

さらにこのシミュレーターを用いて図 4.1 のように宇宙線を大量に発生させるモンテカルロシミュレーションを行った。その結果は第 5 章で述べる。

4.3 座標の設定

宇宙線としてミューオンを想定している[*2]。個々のミューオンはエネルギー E、位置 (x, y, z)、角度 (θ, φ) の 6 変数により特定することができる。

位置についてはビーム軸を z 軸として VETO 上の平面を $z = 0$ の xy 平面とした。水平方向に x 軸、鉛直方向に y 軸をとり、架台左の柱右側面を $x = 0$、VETO 検出器部シンチレータ下端の高さを $y = 0$ とした。VETO は中性子検出器部との距離が長いものと短いものの 2 組が交互に並ぶ構造になっているが (図 3.8)、ここでは距離が長い VETO が並ぶ面を基準面とした。

角度については天頂方向を 0° とした天頂角 θ、NEBULA 左側を 0° とした方位角 φ により定めた。これらの座標の設定を図 4.4 に示す。さらに図 4.4 に示すように、中性子検出器の上面を A, 底面を B,VETO 側の面を D…とラベ

[*1] 詳細は第 B 章参照。
[*2] この設定の妥当性についてはセクション B.1 参照

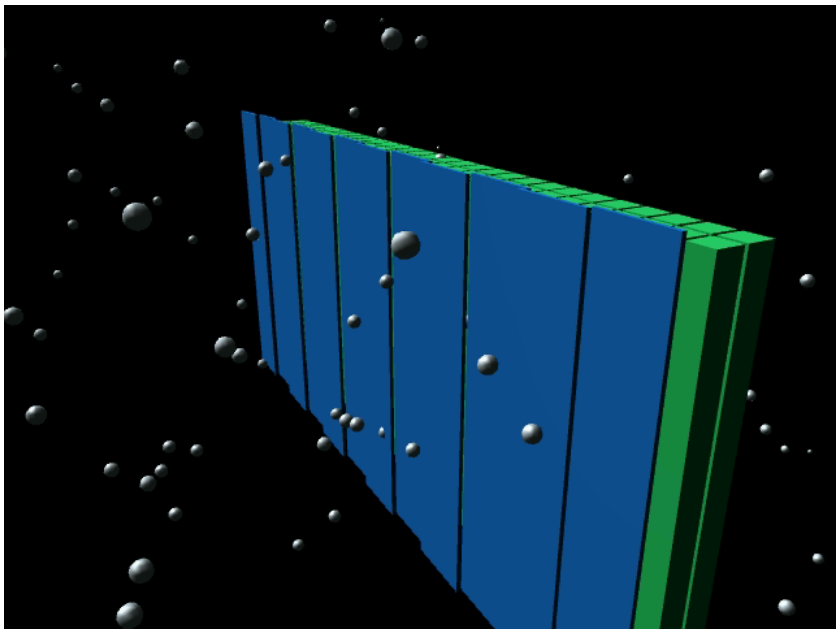


図 4.1: シミュレーションのイメージ：緑は中性子検出器、青は VETO を表す

図 4.2: RIBF 実験棟の外観：シミュレーション中でラフに再現した

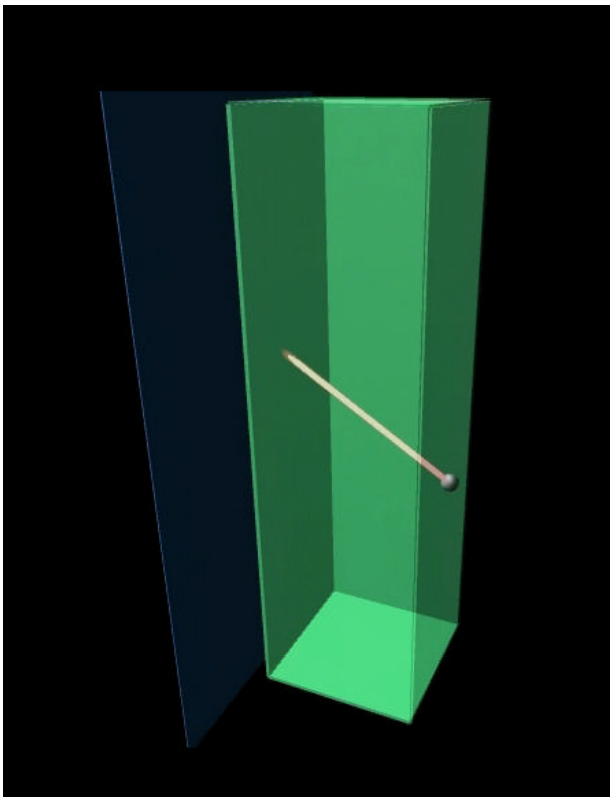


図 4.3: ミューオンの位置・角度に応じて中性子検出器中での飛跡の長さ (赤線の部分) を算出、これを元にエネルギー損失を計算する

ル付けをする。

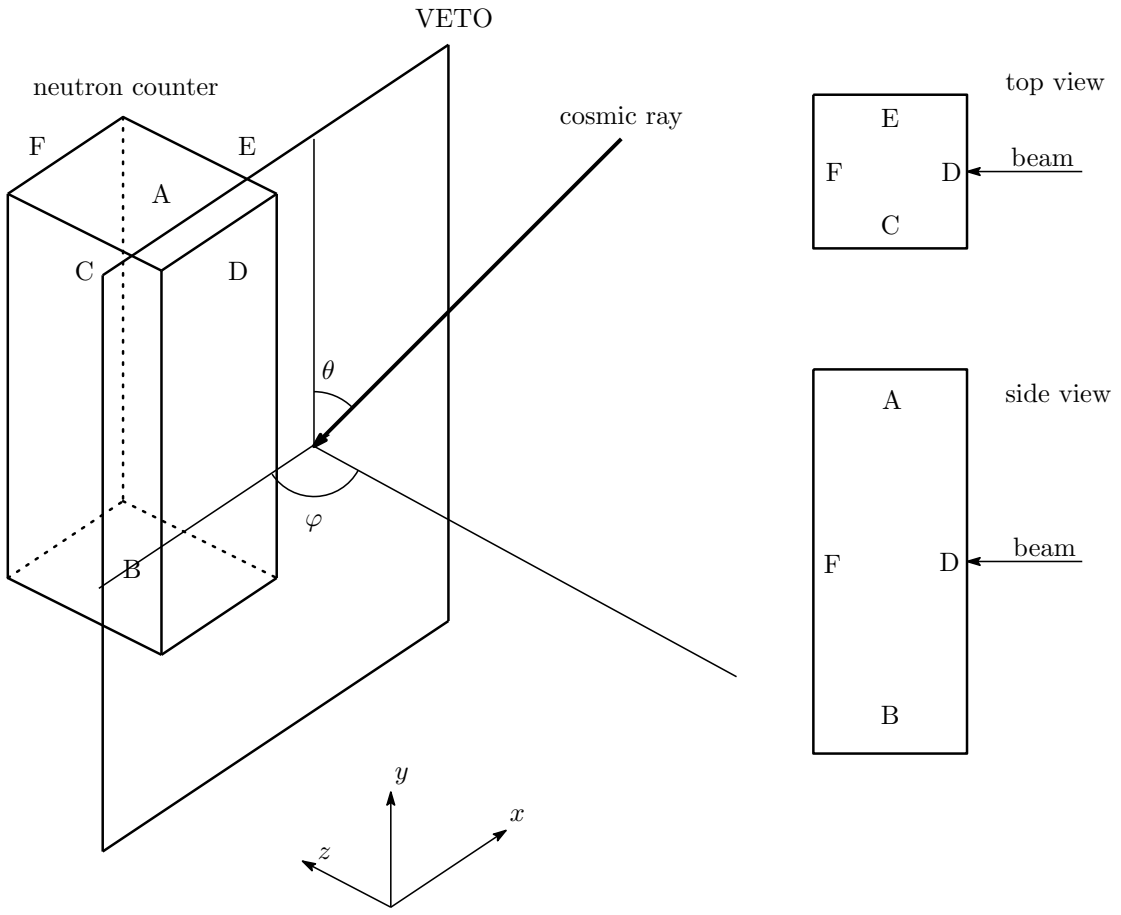


図 4.4: 座標の設定

第 5 章

シミュレーション結果

第 4 章で述べたシミュレーターにより NEBULA のシミュレーションを行った結果を示す。なお、今回のシミュレーションでは地表に設置したと仮定した NEBULA の VETO 全体に約 10^7 個のミューオンをヒットさせてシミュレーションを行った。

以下、セクション 5.1〜5.3 においてシミュレーション結果を線状のヒストグラムで表現するときの色の規約を示す。

黒線

地上での分布を表す。角度分布の場合に単位を「カウント」と表現するとき $\frac{dN}{d\Omega}$ を意味する。ここで Ω は立体角である。

緑線

地下での分布を表す。地下とは NEBULA が設置されている理化学研究所 RIBF 実験棟地下 2 階を指す。

青線

地下に設置された NEBULA の VETO にヒットするイベントの分布を表す。基本的には緑線で示した地下の分布の垂直面に対する射影である。角度分布の場合に単位を「カウント」と表現するとき天頂角分布であれば $\frac{dN}{d\theta}$ を、方位角分布であれば $\frac{dN}{d\varphi}$ を意味する。これは赤線も同様である。

赤線

VETO にヒットしたうえで、かつ中性子検出器にも入射するイベントの分布を表す。

5.1 エネルギー分布

図 5.1(黒) に地表でのミューオンのエネルギー分布を示す。以下同様に図 5.1(緑) に地下、図 5.1(青) に VETO、図 5.1(赤) に VETO と中性子検出器のコインシデンス条件を満たすミューオンのエネルギー分布を示す。

地表では 1GeV 付近にピークをもつ分布が得られ、地下に入ることで粒子数が減っている状況が示されている。ただし、現行のシミュレーターではこの粒子数の減少が実態以上に過剰に評価されている可能性がある。この点についてはセクション 6.5.5 で述べる。

5.2 天頂角分布

図 5.2 上段 (青) にミューオンの天頂角分布を示す。一般に宇宙線の天頂角分布は $\cos^2\theta$ に比例することが知られており、事実、図 5.2 上段 (青) は $\cos^2\theta$(図 5.2 上段 黒の実線) で良くフィットされている。

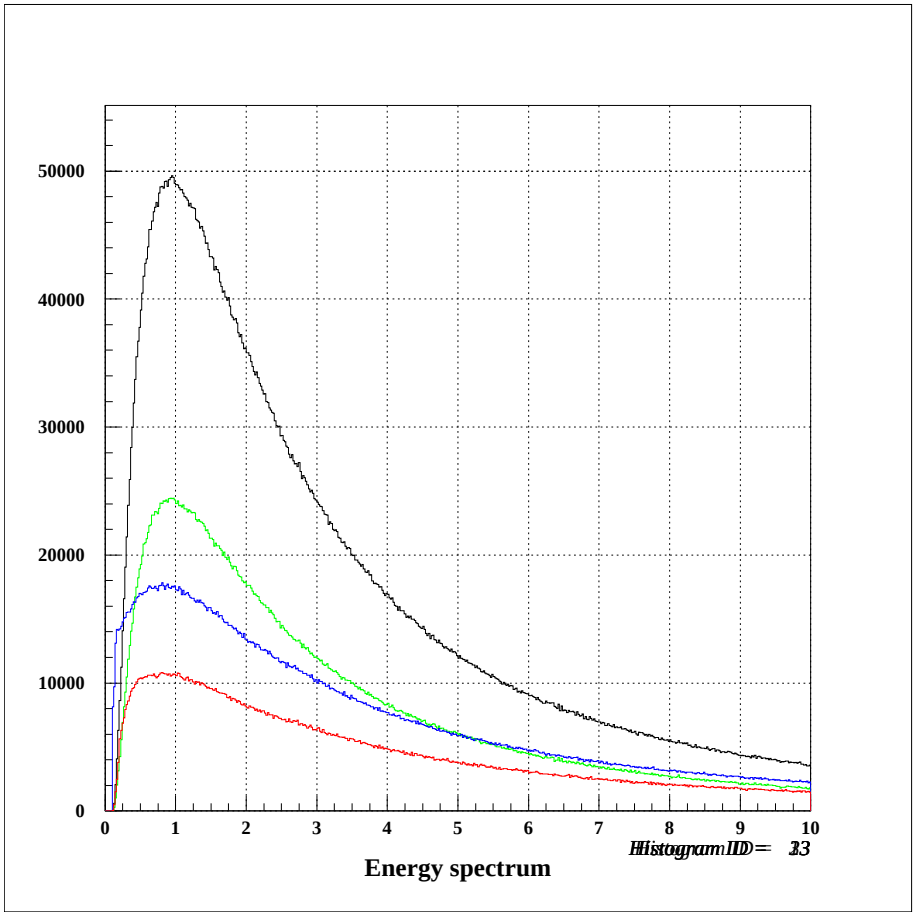


図 5.1: エネルギー分布：地上 (黒)、地下 (緑)、VETO(青)、VETO⊗ 中性子検出器 (赤)　横軸：ミューオンのエネルギー [GeV]　縦軸：カウント

5.2.1　VETO 上での天頂角分布

図 5.2 下段 (青) に VETO に入射するミューオンの天頂角分布を示す。VETO 上のミューオンの天頂角分布は RIBF の建物の構造と土壌の形状を反映して複雑な形になっているが、その全体的な傾向を考察する。まず、全体的に $\theta = 0°$ 方向に寄っているがこれは上段 (青) に示した元々の地表での天頂角分布が $\theta = 0°$ (天頂方向) に寄っていることが原因と考えられる。一方で、地表での立体角当たりの天頂角分布では $\theta = 0°$ が最もカウントが多いのに対し、下段 (青) では $\theta = 0°$ 付近はカウントが非常に少なく $\theta = 30° \sim 35°$ 付近で緩やかなピークを持っている。これは VETO 面すなわち垂直面に対する分布を表しているので $\theta = 0°$ 付近では VETO 面とミューオンの入射ベクトルが平行になりフラックスが減少する効果を表しているものと考えられる。角度の点のみを考えれば VETO 面に対して直交する $\theta = 90°$ が最もカウントが多くなると期待されるが、元々の地表での $\cos^2\theta$ に比例する天頂角分布との重ね合わせで $\theta = 30° \sim 35°$ 付近で緩やかなピークを持つ結果になっていると考えられる。

5.2.2　VETO と中性子検出器のコインシデンス

さらに VETO と中性子検出器のコインシデンス条件 (図 5.2 下段 (赤)) では全体的な粒子数が減少していることに加え、$\theta = 0°$ 付近では粒子数の減少が大きく、$\theta = 90°$ 付近では逆に粒子数の減少が小さく余り減っていないという粒

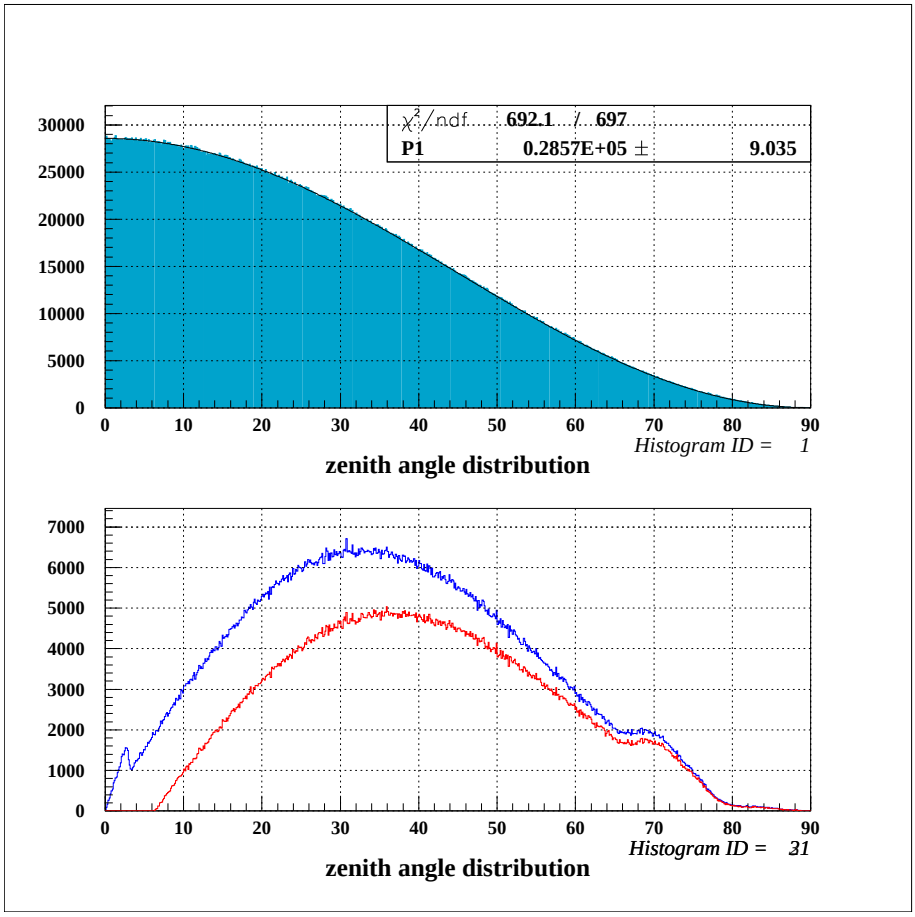


図 5.2: 天頂角分布　上段：地上 (青)、実線 (黒):$\cos^2\theta$ によるフィット。右上の P1 はフィットに関するパラメーターであり、今回の場合は $\cos^2\theta$ にかかる係数を表す。　下段：地下の VETO(青)、VETO⊗ 中性子検出器 (赤)　横軸：天頂角 $\theta[^\circ]$　縦軸：カウント

子数減少の効果の角度に対する非対称性が確認できる。この非対称性については前述した角度とフラックスについての議論とほぼ同じ論理で説明できる。

ここで VETO と中性子検出器両方をコインシデンス可能な最小の角度 $\theta_{\min}$ を見積もる。ミューオンが VETO 検出器部プラスチックシンチレータ上端を経由して中性子検出器部プラスチックシンチレータ下端へ到達すると次式が成り立つ (図 5.3)。

$$21 = 185 \times \tan(\theta_{\min}) \tag{5.2.1}$$

したがって、

$$\theta_{\min} = \arctan\left(\frac{21}{185}\right) \sim 6.5^\circ \tag{5.2.2}$$

を得る。これは図 5.2 下段 (赤) のカウントが 0 から立ち上がる角度と一致する。

逆に天頂角が大きくなり $\theta = 90^\circ$ に近くなると VETO に入射できれば (方位角にも依るが) ほぼそのまま中性子検出器を通過することが可能で、大角度ではあまり粒子が減っていないものと考えれる。

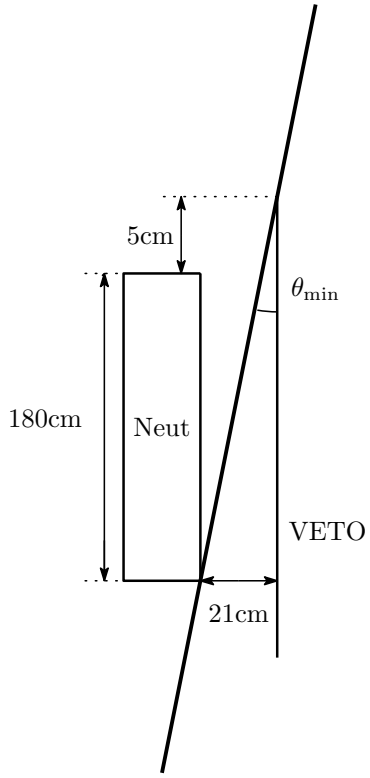


図 5.3: VETO と中性子検出器の位置関係

5.3 方位角分布

図 5.4 上段 (黒) に地表での方位角分布を示す。宇宙線の地表での方位角分布は一様であることが知られており図 5.4 上段 (黒) はその分布を表している。

5.3.1 地下での分布と粒子数の減少

図 5.4 下段 (青) に VETO に入射するミューオンの方位角分布を示す。この分布を見ると $\varphi = 90°$ 近辺でピークのようになり、一方で $\varphi = 0°$ に近い、もしくは $\varphi = 180°$ に近いほど粒子数が減っている。このような角度の場合 VETO の面に対してより平行に近くなる。するとその分コンクリートや土壌を斜めに突き抜けることになりコンクリートや土壌での飛跡の長さが長くなる。よって飛跡の長さが長くなった分エネルギー損失も増えることになり結局粒子数が減っているものと理解できる。

5.3.2 VETO と中性子検出器のコインシデンス

RIBF 実験棟及び土壌の影響全てをカットした場合の VETO に入射したミューオンの方位角分布 (青) と、VETO と中性子検出器のコインシデンス条件のミューオンの方位角分布 (赤) を図 5.5 に示す。

図 5.5 では VETO に入射するミューオンの方位角分布はほぼ一様になっている。一方で中性子検出器とのコインシ

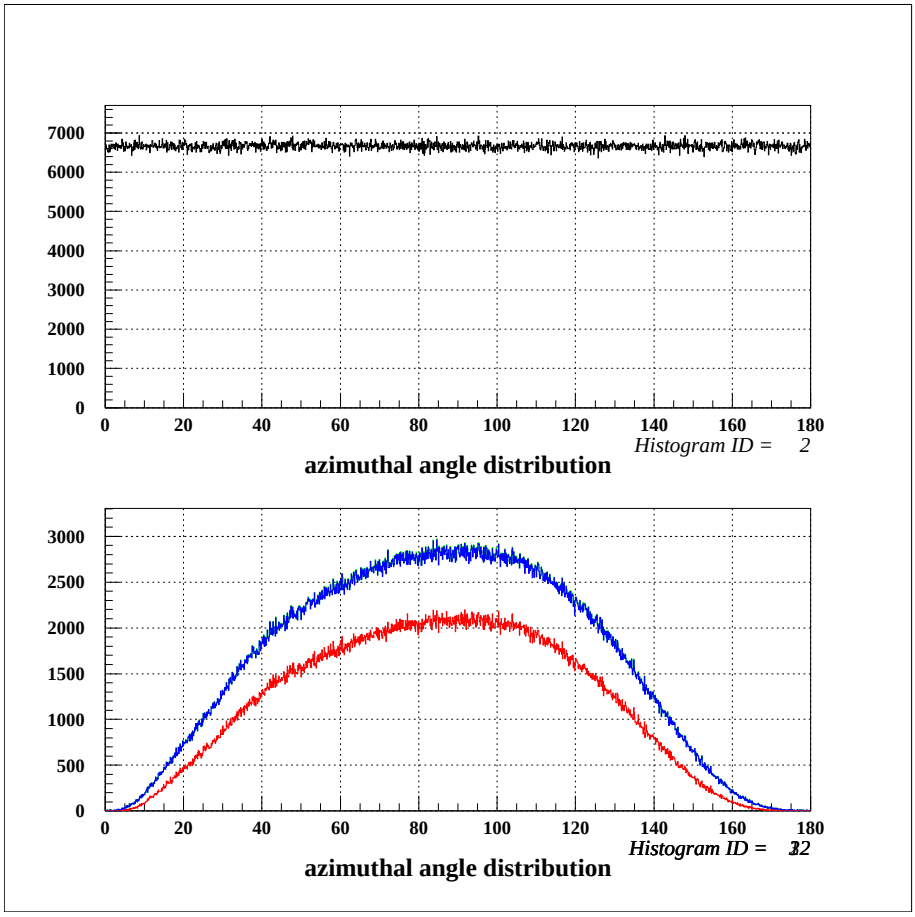


図 5.4: 方位角分布　上段：地上 (黒)　下段：VETO(青)、VETO⊗ 中性子検出器 (赤)　横軸：方位角 φ[°]　縦軸：カウント

デンスをとった場合はコンクリート補正などが無いにも関わらず $\varphi = 0°$ および $\varphi = 180°$ 付近で粒子数が減っている。これはこのような VETO 面に対して平行に近くなると中性子検出器に入射せず横に逸れるイベントが多くなるためと考えられる。さらに方位角とは独立に天頂角に依存して下方に逸れるイベントが存在するために全体的に粒子数が減っていると理解できる。

上記の議論がコンクリート・土壌の補正を入れた VETO⊗ 中性子検出器 (図 5.4 下段 (赤)) でも成り立ち、VETO での方位角分布 (図 5.4 下段 (青)) に比べ全体的な粒子数がさらに減っていると考えられる。

5.3.3　分布の非対称性

ここまでで方位角 $\varphi = 0°$ もしくは $\varphi = 180°$ 付近で粒子が減少していることについて議論した。このセクションでは分布の左右非対称性について論ずる。

図 5.4 下段 (赤) においても図 5.4 下段 (青) においても $\varphi = 90°$ 付近をピークとしているが、より角度が小さい領域では緩やかに粒子数が減っていく一方で、より角度が大きい領域では粒子数が急激に減少し全体として方位角が小さい側 (NEBULA に向かって左側) に寄っていることが分かる。この非対称性は RIBF 実験棟の地下構造と土壌の分布により起きていると考えられる。

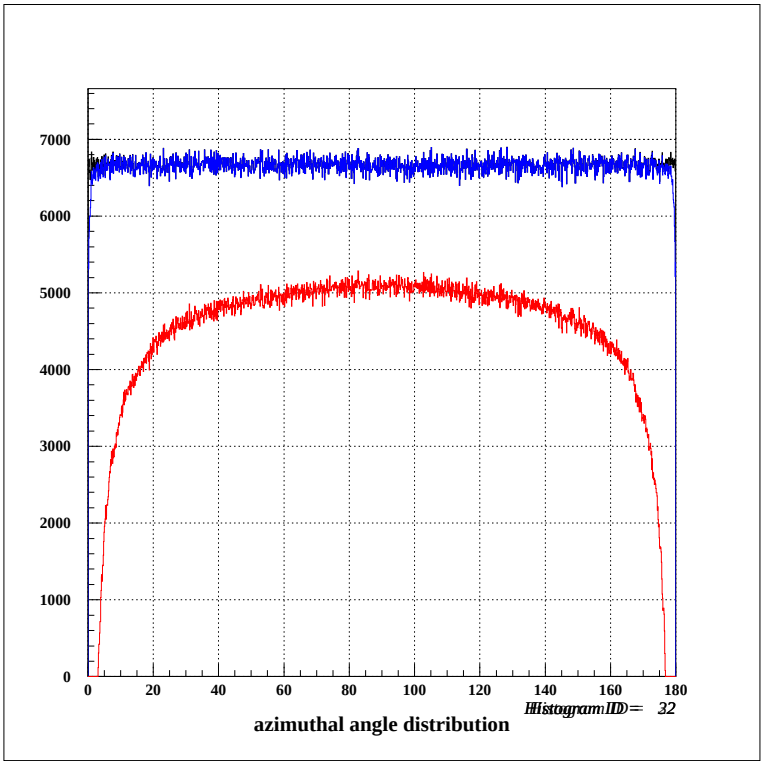


図 5.5: 方位角分布 (コンクリート・土壌補正無し)　上段：地上 (黒)　下段：地下 (緑)、VETO(青)、VETO⊗ 中性子検出器 (赤)　横軸：方位角 $\varphi[^\circ]$　縦軸：カウント

現在の NEBULA の配置[*1]では NEBULA に向かって左側は RIBF 実験棟の地下の構造物が存在する。これは換言すれば、コンクリート間にエネルギー損失をほぼ無視できる空気の層が多量に存在することになる[*2]。一方で、NEBULA 向かって右側はすぐに壁がありその向こう側は土壌である。シミュレーターでは土壌は密に詰まっていると想定している。すると、NEBULA の周りの物質の分布は左側はより物質が少なく (=エネルギー損失が少なく)、右側は物質が多い (=エネルギー損失が多い) ことになる。

以上のような物質の分布の非対称性を図 5.4 下段では反映しているものと考えられる。

5.4　VETO から中性子検出器への入射粒子数

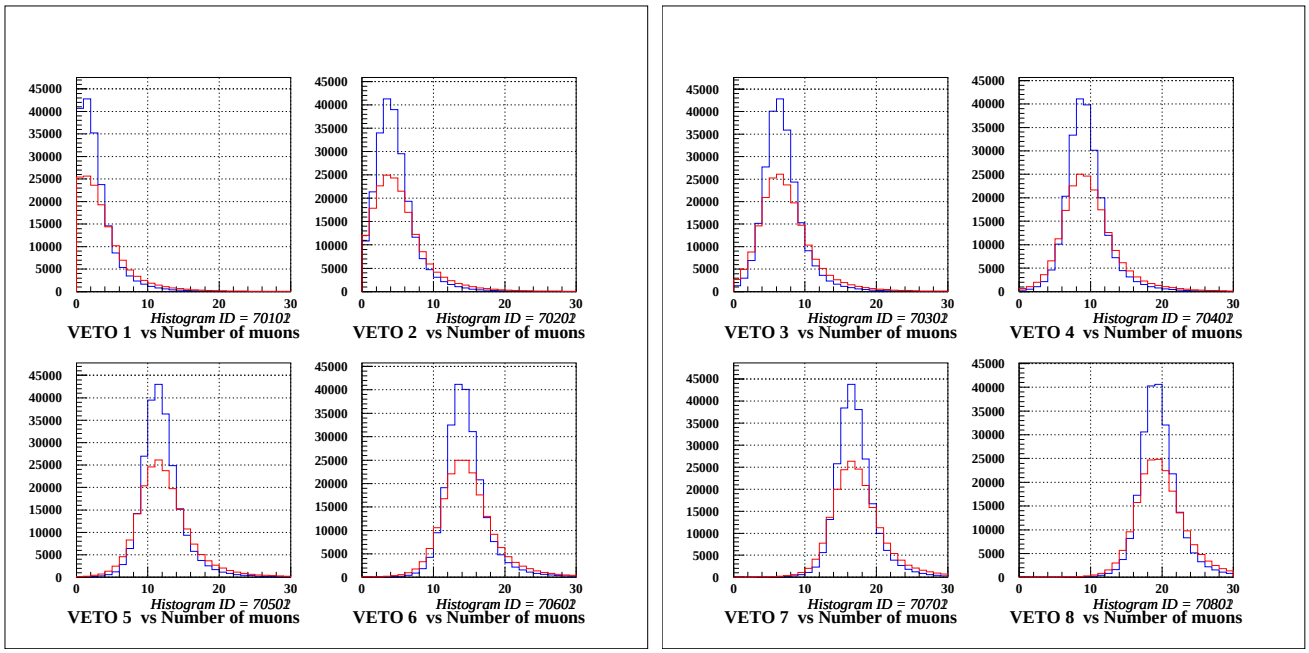
各 VETO から各中性子検出器へのミューオンの入射個数を図 5.6 に示す。ここで青線は前面側の中性子検出器 (ID 100 番台) を、赤線は背面側の中性子検出器 (ID 200 番台) を表す。セクション 5.3 における方位角分布の議論により $\varphi = 0^\circ$ もしくは $\varphi = 180^\circ$ 近辺では粒子数が少なく、$\varphi = 90^\circ$ 近辺で多いことが分かっている。その為、どの VETO からもその眼前にある中性子検出器に入射する数が一番多くなるはずである。図 5.6 はこの考察通りの結果を示している。

さらに、前面側の中性子検出器では入射粒子数が多く、背面では同じ角度でもより離れた中性子検出器に入射できるためにより外側の中性子検出器にも到達している様子が確認できる。

粒子数分布は左右対称になっておらず、左に比べると右の方がより長いテールを引いている様子が確認できる。こ

[*1] 詳細な RIBF 実験棟の地下構造と NEBULA の配置については図 B.59, B.60,B.61 参照
[*2] シミュレーターでは空気でのエネルギー損失は無視している

れはセクション 5.3 で論じたように方位角の小さい領域のミューオンの方がより多くなるので左から右へ突き抜けるミューオンの方が多くなることによるものと考えられる。



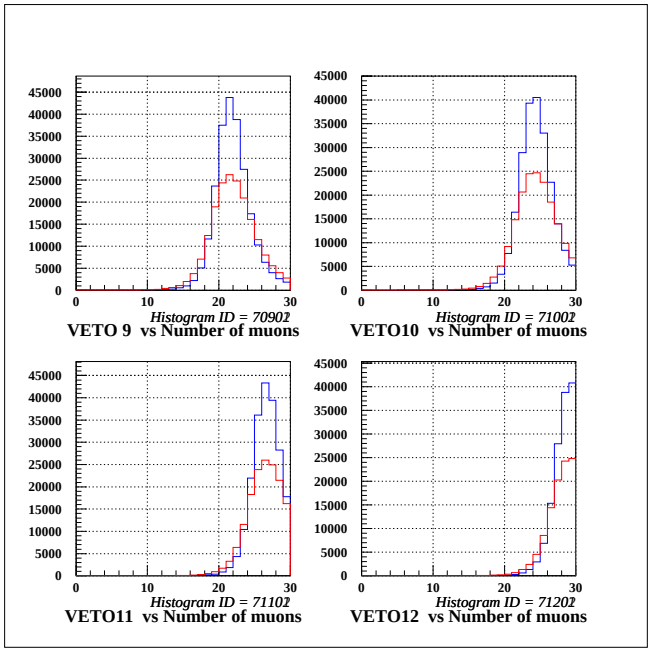


図 5.6: 各 VETO から各中性子検出器へのミューオンの入射個数　青： 前面、赤： 背面、　横軸： 中性子検出器 ID　縦軸： カウント

5.5　飛跡の長さ分布

図 5.7, 5.8 に中性子検出器中での飛跡の長さの分布の例として VETO105 に対する分布を示す[*3]。
飛跡の長さ分布にはピークが立っている。これを理解するため次の条件でシミュレーションを行った。

- 中性子検出器 1 モジュールを VETO1 モジュールの中央に配置する
- RIBF の建物・土壌の影響を全て無視する

以上の設定で中性子検出器・VETO のコインシデンスの条件の下、中性子検出器に入射した全てのミューオンのパスを追跡した。ミューオンが中性子検出器のどの面から入射しどの面に抜けていくかをパスごとにカウントし、前面から背面に抜けるイベントを赤線で、それ以外のパスを青線で示したものが図 5.9 である。

面のラベルの設定は図 4.4 に従う。具体的なパスについてはセクション B.8 参照。図 5.9 に示されたように中性子検出器と VETO のコインシデンスの条件の下では DF、すなわち中性子検出器の前面から背面に抜けていく場合が最も多く、12cm を越えたところで鋭いピークを作る。この 12cm という値は中性子検出器の厚さと一致する。前面から背面に抜ける場合は中性子検出器の厚みが飛跡の長さの最小値となるため 12cm 以下の飛跡の長さをとることができない。したがって図 5.9 赤線のようなピークを作ると考えられる。

一方で図 5.9 青線に示した前面から背面以外のパスでは中性子検出器をかすめるようなパスが可能であり、飛跡の長さがより短くなることが可能である。故に図 5.9 青線のような分布になると考えられる。これらを合わせると図 5.7, 5.8 におけるピークが生ずることになる。つまり、飛跡の長さ分布におけるピークは前面から背面に抜けるイベントにより生ずるものであり、このようなパスをとることが不可能な VETO からより離れた中性子検出器ではピークがその他の部分に埋没していると考えられる。

[*3] 実際には VETO105 だけでなく VETO101 から VETO112 まで全ての組合せで同様のヒストグラムを出力しているが、どれも同じ議論が成り立つのでここではその一例として VETO105 の、かつ前面側の中性子検出器に対する分布のみを取り上げた。

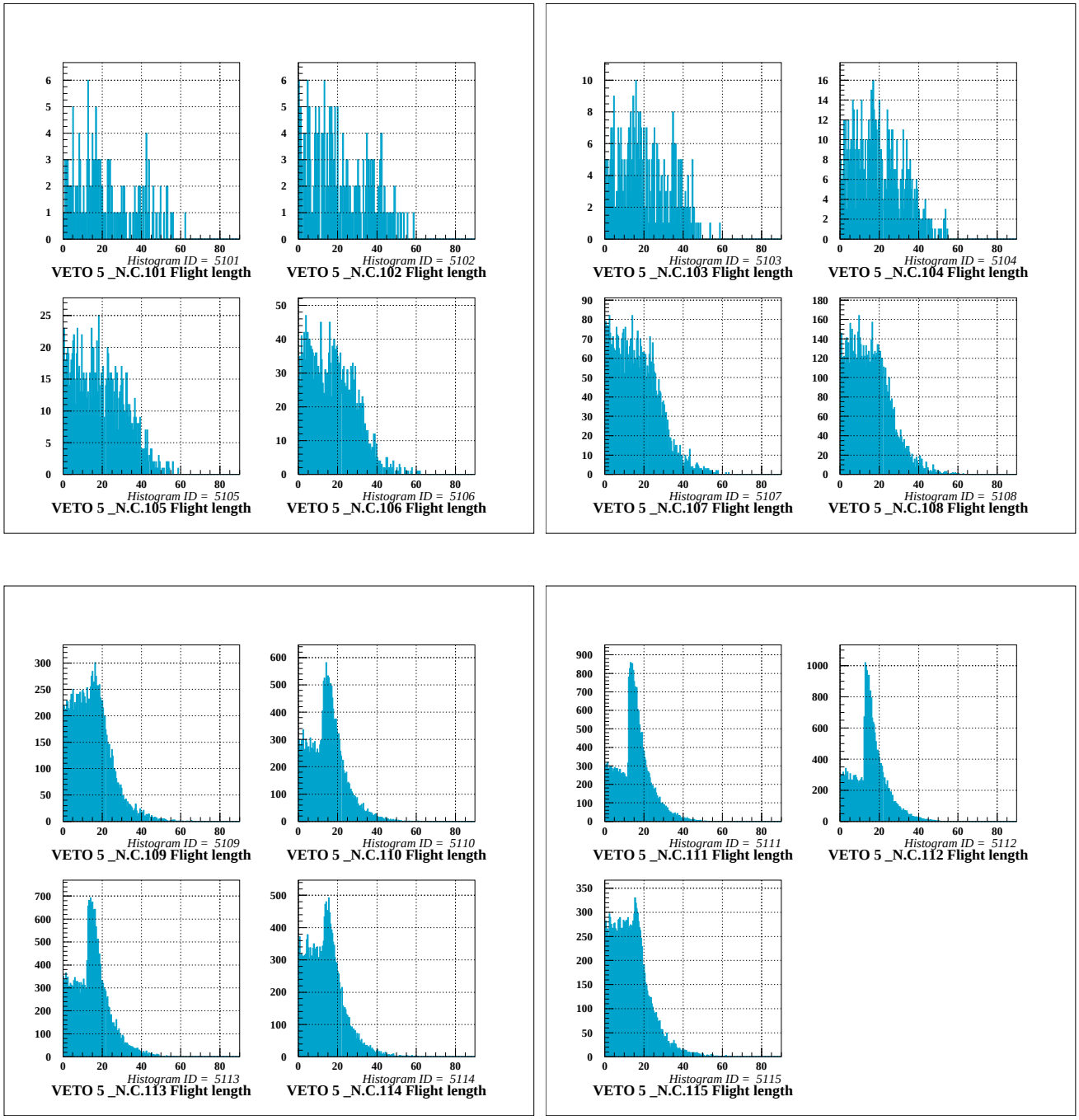


図 5.7: 飛跡の長さ分布 (VETO105) N101 〜115 横軸:飛跡の長さ [cm] 縦軸:カウント

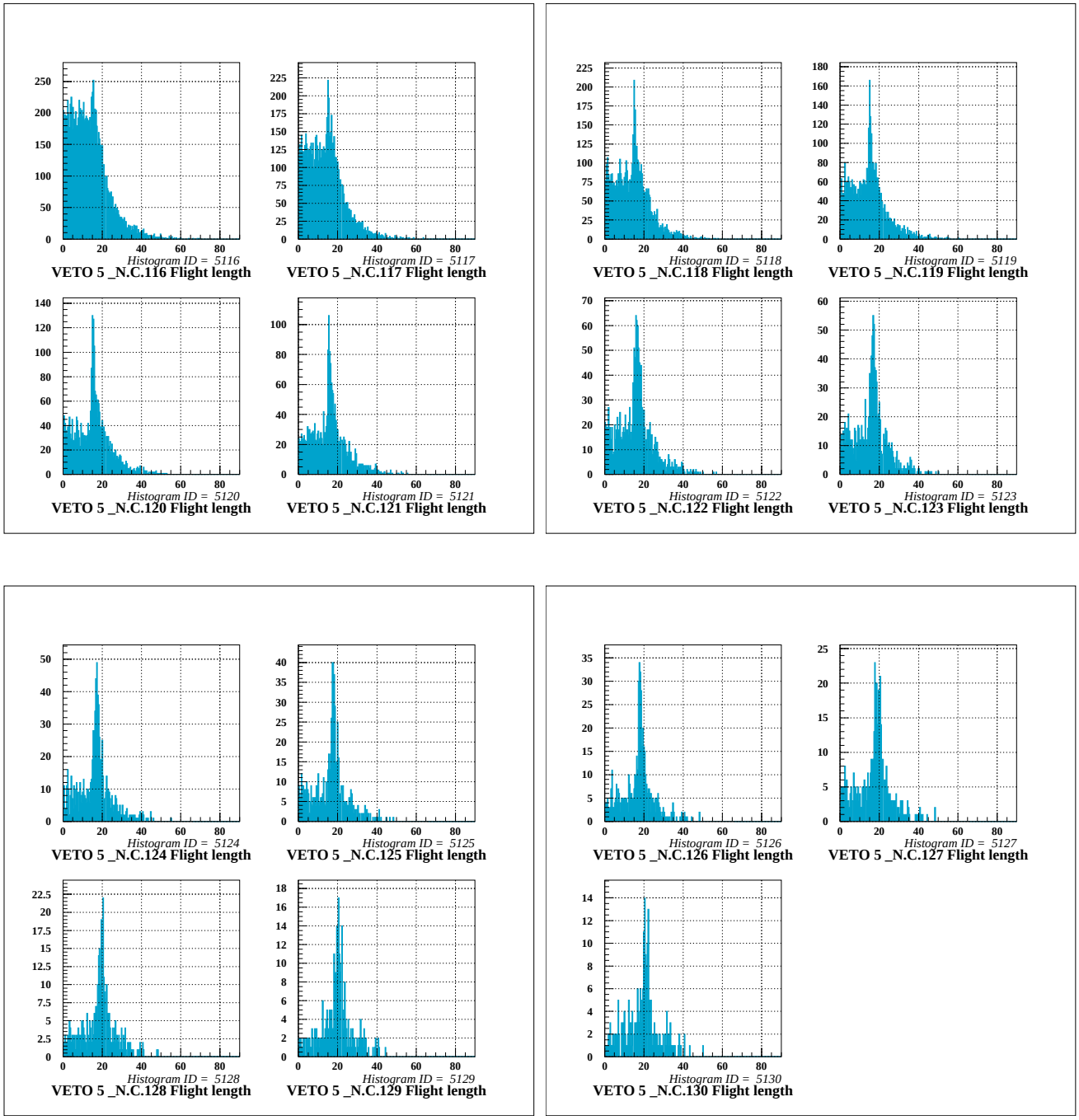


図 5.8: 飛跡の長さ分布 (VETO105) N116 〜130 横軸:飛跡の長さ [cm] 縦軸:カウント

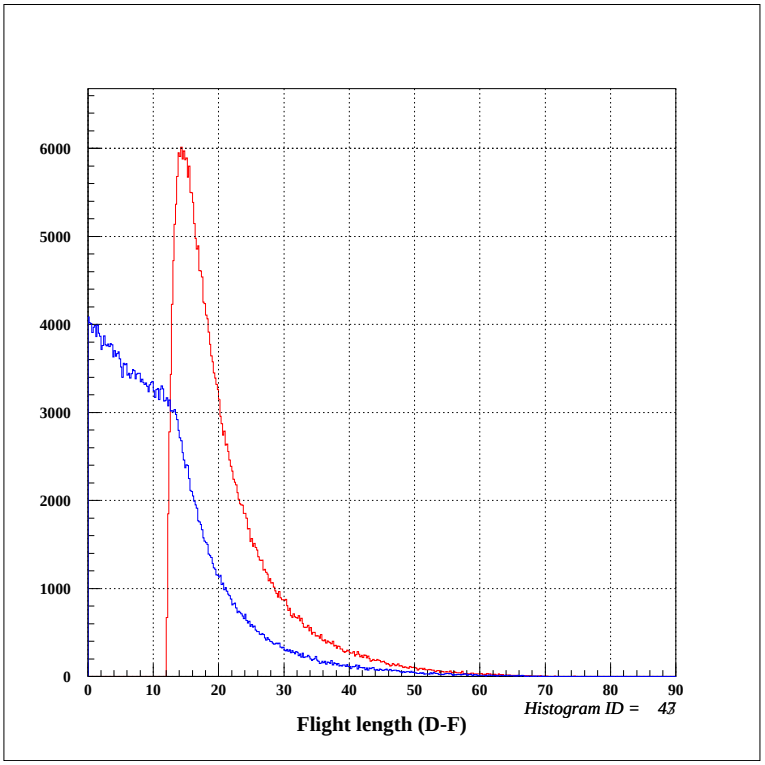


図 5.9: 飛跡の長さ分布　赤：D-F(中性子検出器前面から背面へ) のみ、青：D-F 以外全てのパス　横軸：飛跡の長さ [cm]　縦軸：カウント

5.6　エネルギー損失分布 一次元

図 5.10〜**??**にエネルギー損失分布 (一次元) の例として VETO105 とのコインシデンス条件を満たしたミューオンについて各中性子検出器ごとに示す[*4]。図中の赤がエネルギー損失そのものの値、緑と青は光の減衰[*5]を考慮に入れた上部および下部光電子増倍管単独で観測できる値に相当する。

セクション 5.5 で述べた飛跡の長さに依るピークがさらにランダウ分布などのエネルギー損失に伴う不定性[*6]でなまった形で表れている。このピークは VETO のすぐ近くの中性子検出器で顕著である。これはセクション 5.5 で述べた中性子検出器前面から背面に抜けるイベントが、このような VETO 付近の中性子検出器でのみ起こり得るイベントであるからである。また方位角分布の結果により垂直に抜けていくミューオンが最も多いと分かっているので VETO 近辺の中性子検出器、例えば ID=112 では統計も多く明確なピークを得ている。

一方で VETO から離れるに従い統計が少なく、前面から背面に抜けるイベントがなくなることによりピークと呼べるようなものは観測しにくくなっている。

[*4] エネルギー損失についても飛跡の長さと同様、実際には VETO105 だけでなく VETO101 から VETO112 まで全ての組合せで同様のヒストグラムを出力しているが、どれも同じ議論が成り立つのでここではその一例として VETO105 の中性子検出器前面に対する分布を取り上げた。

[*5] 詳細はセクション B.7 参照

[*6] 詳細はセクション B.4 参照

5.6.1　エネルギー損失のピーク値

シミュレーション結果をエネルギー較正に使うためにはエネルギー損失のピーク値を求める必要がある。そこでこのピーク値を求めるためにランダウ分布によるフィットを行った[*7]。このフィットはコンクリート・土壌の補正の効果を調べるために補正をしたもの、していないもの両方に対して行った。また、前述のように VETO と中性子検出器の組合せにより統計が大きく異なるので統計が多い組合せを選んでフィットを行った。

コンクリート・土壌補正の効果を調べるため図 5.12 に補正前のエネルギー損失分布 (青) と補正後のエネルギー損失分布 (赤) を示す。表 5.1 にランダウ分布でフィットした結果を示す。図 5.13 にその結果をプロットして示した。ただし、表 5.1 および図 5.13 に示した誤差はランダウ分布のフィットに関する誤差のみを表している。シミュレーションの過程において他の誤差を含んでいるはずであるが、現時点ではそれらの誤差に関する定量的な議論を行える段階には至っていない。しかし、ランダウ分布によるフィットを行う限りにおいてはシミュレーションで発生する誤差の最小の最小値と考えることができる。

図 5.12 よりコンクリート・土壌補正により粒子数は減少しているものの、ヒストグラムの形状はほとんど変わらないことが分かる。

さらに、図 5.13 を見ると補正前後の結果には大きな違いが見られないことが分かる。

[*7] セクション 5.5 で論じたように中性子検出器中での飛跡の長さは特有の分布を示している。したがって、本来は飛跡の長さを定数としてエネルギー損失の分布を与えるランダウ分布によりフィットを行うことは厳密には正しくない。だが、ここではピーク値を求めるための近似的な方法としてランダウ分布によるフィットを行った。

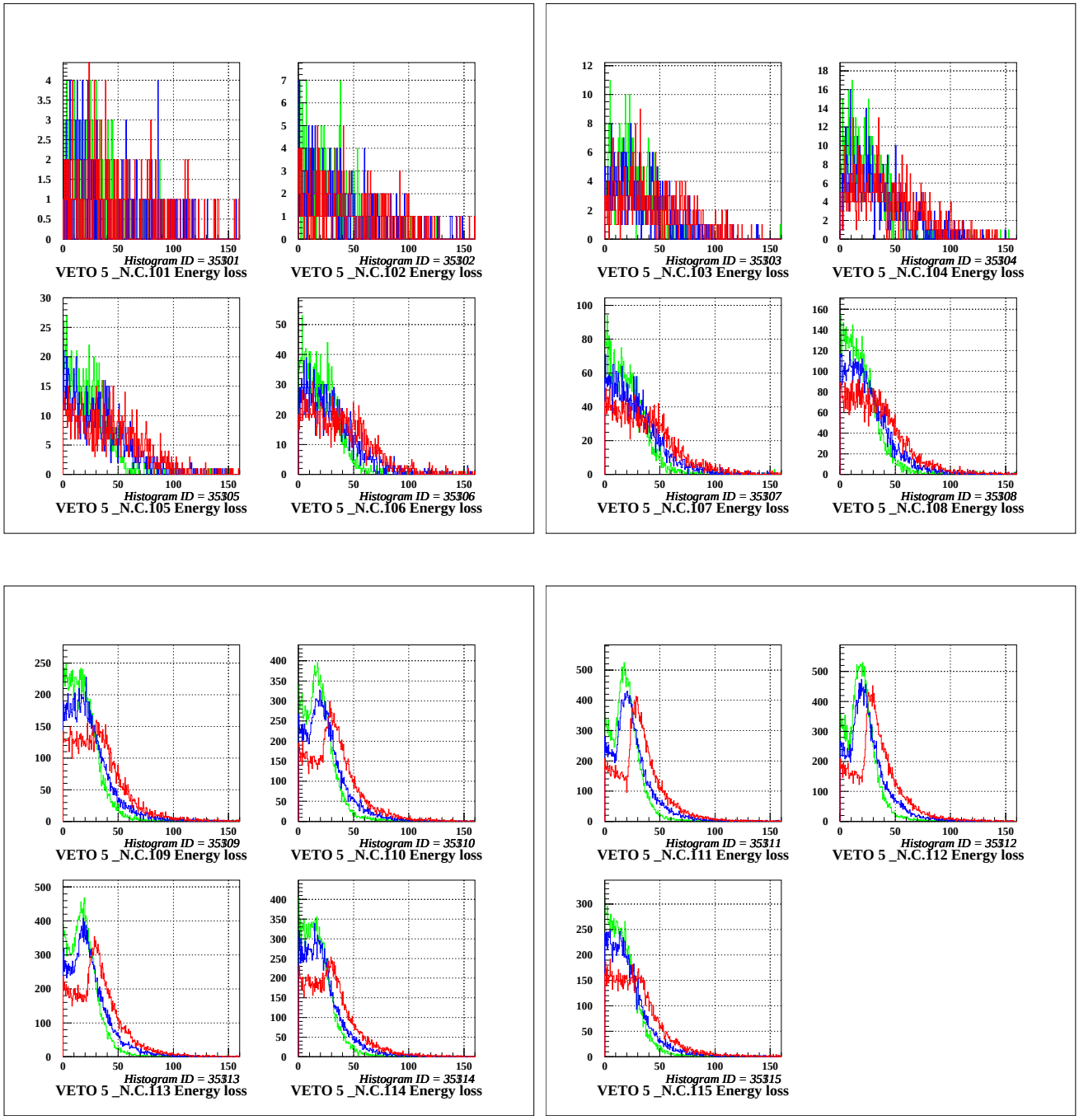


図 5.10: エネルギー損失分布 (VETO105 と中性子検出器 101〜115)　横軸:エネルギー損失 [MeV]　縦軸:カウント
緑:上部 PMT、青:下部 PMT、赤:相乗平均

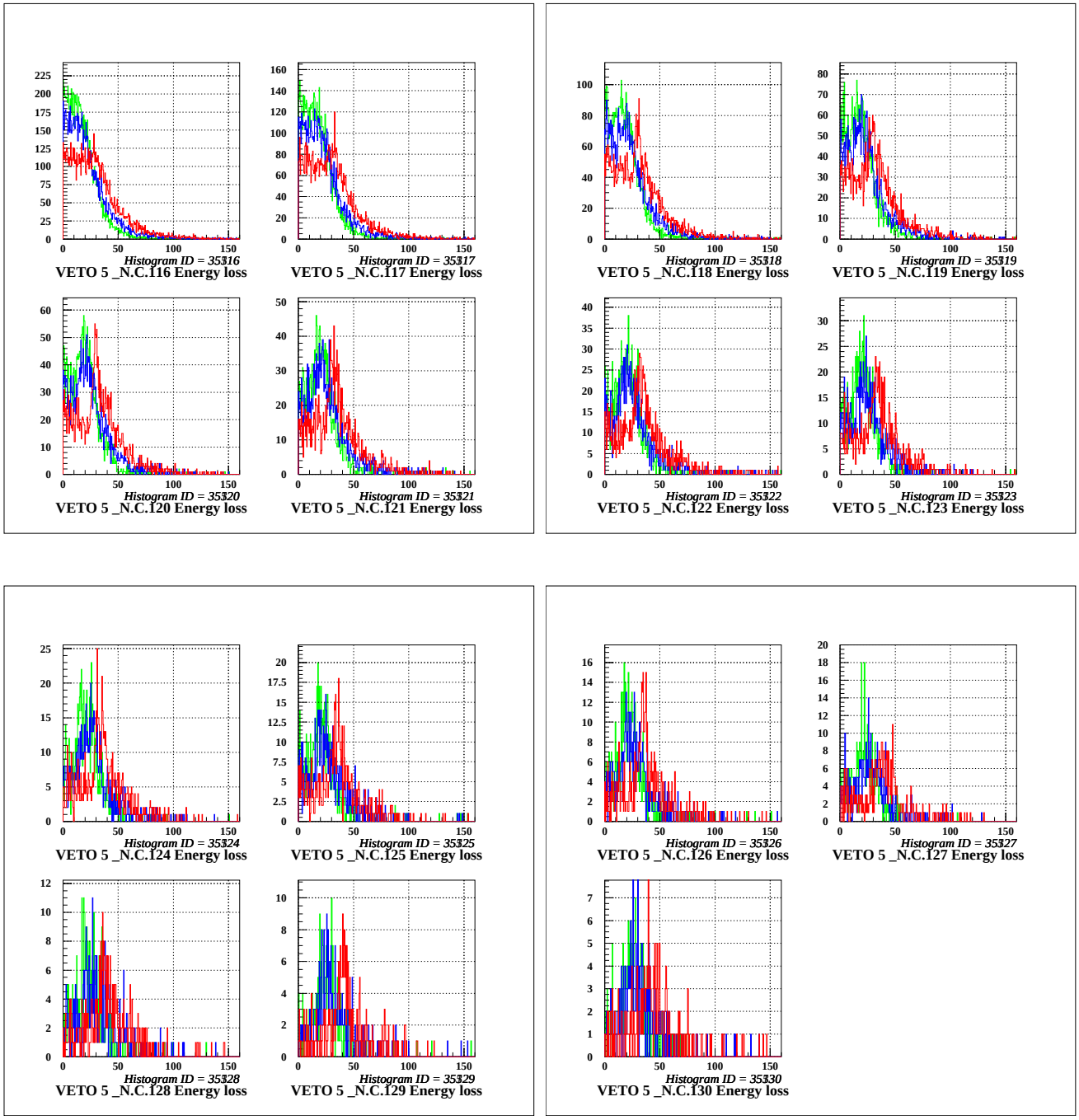


図 5.11: エネルギー損失分布 (VETO105 と中性子検出器 116〜130)　横軸:エネルギー損失 [MeV]　縦軸:カウント
緑:上部 PMT、青:下部 PMT、赤:相乗平均

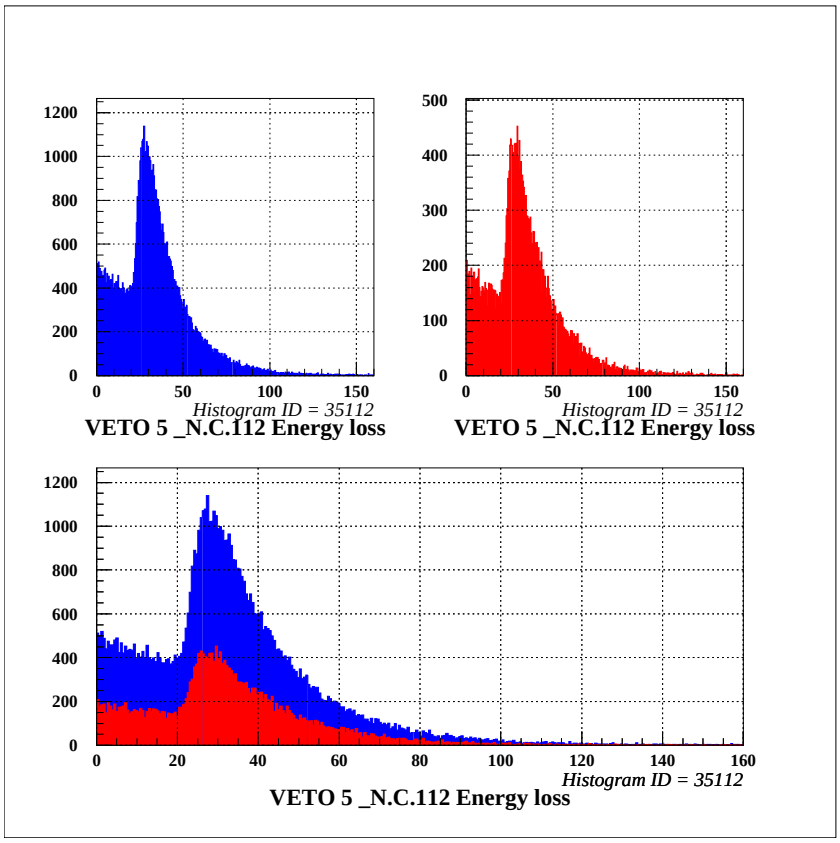


図 5.12: コンクリート・土壌補正の効果の例　青:VETO105⊗ 中性子検出器 112 のエネルギー損失 (コンクリート・土壌補正無し)、赤:VETO105⊗ 中性子検出器 112 のエネルギー損失 (コンクリート・土壌補正有)、上段:スケールを合わせず独立にプロット、下段:スケールを合わせて同時にプロット、横軸:エネルギー損失 [MeV]、縦軸:カウント

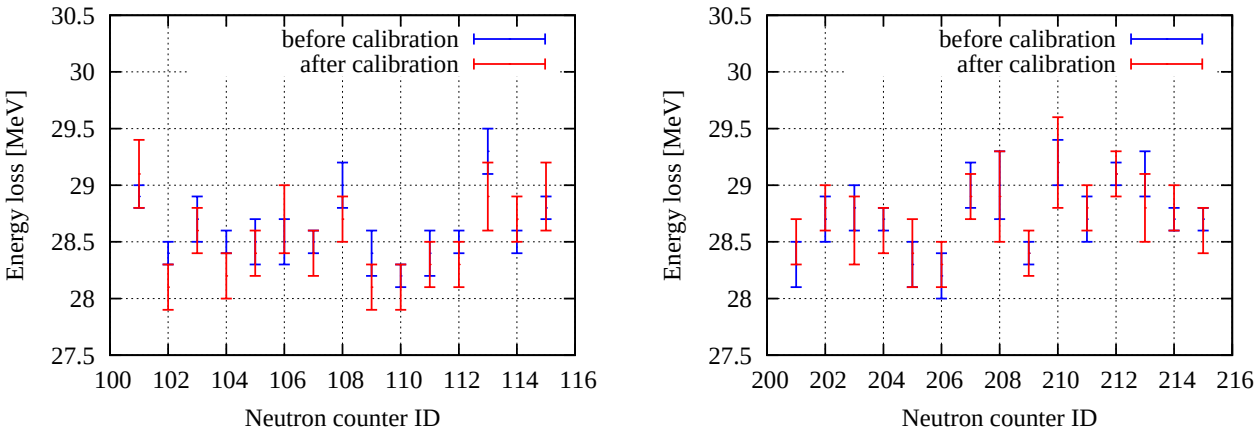


図 5.13: エネルギー損失のピーク値　青:コンクリート・土壌補正前、赤:コンクリート・土壌補正後　横軸:中性子検出器 ID　縦軸:エネルギー損失 [MeV]　エラーバーの示す誤差はランダウ分布のフィットに関する誤差のみであり、他の誤差を含まない。

ID		エネルギー損失 [MeV]	
VETO	中性子検出器	補正前	補正後
101	101	28.9 ± 0.1	29.1 ± 0.3
101	102	28.4 ± 0.1	28.1 ± 0.2
101	103	28.7 ± 0.2	28.6 ± 0.2
102	104	28.5 ± 0.1	28.2 ± 0.2
102	105	28.5 ± 0.2	28.4 ± 0.2
103	106	28.5 ± 0.2	28.7 ± 0.3
103	107	28.5 ± 0.1	28.4 ± 0.2
103	108	29.0 ± 0.2	28.3 ± 0.2
104	109	28.4 ± 0.2	28.1 ± 0.2
104	110	28.2 ± 0.1	28.1 ± 0.2
105	111	28.4 ± 0.2	28.3 ± 0.2
105	112	28.5 ± 0.1	28.3 ± 0.2
105	113	29.3 ± 0.2	28.9 ± 0.3
106	114	28.5 ± 0.1	28.7 ± 0.2
106	115	28.8 ± 0.1	28.9 ± 0.3
101	201	28.3 ± 0.2	28.5 ± 0.2
101	202	28.7 ± 0.2	28.8 ± 0.2
101	203	28.8 ± 0.2	28.6 ± 0.3
102	204	28.7 ± 0.1	28.6 ± 0.2
102	205	28.3 ± 0.2	28.4 ± 0.3
103	206	28.2 ± 0.2	28.3 ± 0.2
103	207	29.0 ± 0.2	28.9 ± 0.2
103	208	29.0 ± 0.3	28.9 ± 0.4
104	209	28.4 ± 0.1	28.4 ± 0.2
104	120	29.2 ± 0.2	29.2 ± 0.4
105	211	28.7 ± 0.2	28.8 ± 0.2
105	212	29.1 ± 0.1	29.1 ± 0.2
105	213	29.1 ± 0.2	28.8 ± 0.3
106	214	28.7 ± 0.1	28.8 ± 0.2
106	215	28.7 ± 0.1	28.6 ± 0.2

表 5.1: エネルギー損失のピーク値：第一列はコインシデンスの対象として選んだ VETO の ID を表す。表中の誤差はランダウ分布のフィットに関する誤差のみ表し、他の誤差を含んでいない。補正後の方が誤差が大きくなる傾向にあるのはコンクリート・土壌補正により粒子数すなわち統計が減っているためである。

第 6 章

テスト実験

6.1 光電子増倍管のゲインテストと ID 設定

6.1.1 目的

同じ型番の光電子増倍管でもゲインの値には個体差が存在する。中性子検出器部および VETO 検出器部の 1 モジュールには同程度のゲインを持つ光電子増倍管 2 個を使用することが望ましい。そこで、NEBULA に使用する全ての光電子増倍管についてゲインの試験を行い、結果をもとに ID の設定を行った。

6.1.2 実験方法

多数の光電子増倍管のゲインを効率的に調べるためデータ収集システム (DAQ[*1]) を使わないこととした。

放射線源付のプラスチックシンチレータ (図 6.1) を光電面中心にオプティカルグリスをつけて接着 (図 6.2)、遮光した後、図 6.3 のようなセットアップでオシロスコープによりパルスハイトを記録した。このパルスハイト (波高) を以ってゲインとした。

図 6.1: プラスチックシンチレータ : 直径:8.1mm, 高さ:4.5mm の円柱型、カウントレート:33cps 程度

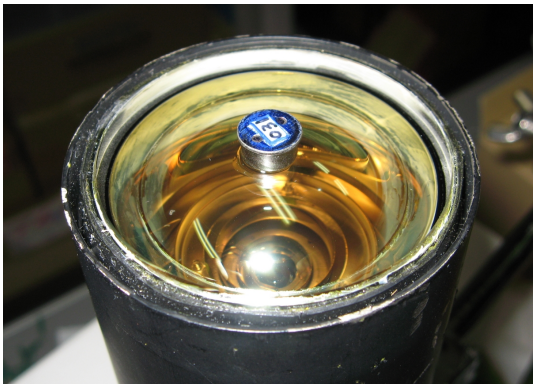


図 6.2: 光電面中心にセットしたシンチレータ

[*1] Data Acquisition

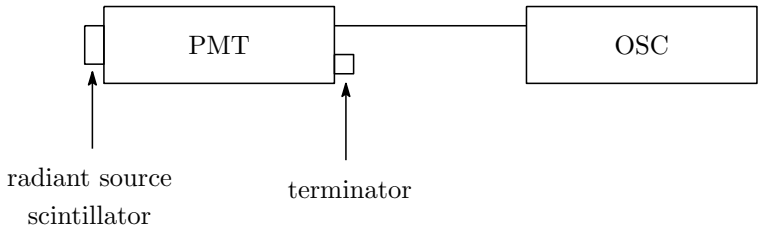


図 6.3: 光電子増倍管のゲインテストのセットアップ　PMT:光電子増倍管　OSC:オシロスコープ

6.1.3 ゲインの調査結果と ID 設定

光電子増倍管合計 346 本の調査の結果、BA4490 が不良品であることが判明した。他の光電子増倍管は正しく動作したので各光電子増倍管に ID を設定し NEBULA に使用した[*2]。

6.2 光電子増倍管の信号チェック

6.2.1 目的

光電子増倍管の信号をオシロスコープで観察すると主要なピークとは別にセカンドピークが確認できた。この原因を突き止めることを目的として実験条件を変えながら波形の観測を行った。

6.2.2 実験方法

下記のように実験条件を変えながらオシロスコープで波形を観測した[*3]。使用した光電子増倍管はダイノード信号出力コネクタ無しの BA4469、およびコネクタ有りの BA3231 である。これらは NEBULA に用いているのと同じ型番 R7724 である。実験のセットアップはセクション 6.1 と同一である。

- 遮光の強化
- 終端抵抗の変更
- SHV,BNC ケーブルの変更
- 電源ユニットの変更

6.2.3 結果

いずれの条件下においてもセカンドピークの解消には至らなかった。結局、浜松ホトニクス側の行った Voltage Divider のアノード間をつなぐシールドされていない線 (図 6.4) を切ることでしか改善は見られておらず、原因はこのシールドされていない線にあるものと考えざるを得ない。光電子増倍管 ID400 番台以降についてはこの線を同軸ケーブルに変更することにより改善を図っている。

[*2] 実験結果と ID 設定の詳細はセクション A.3 参照。
[*3] 実験条件の詳細はセクション C.3 参照

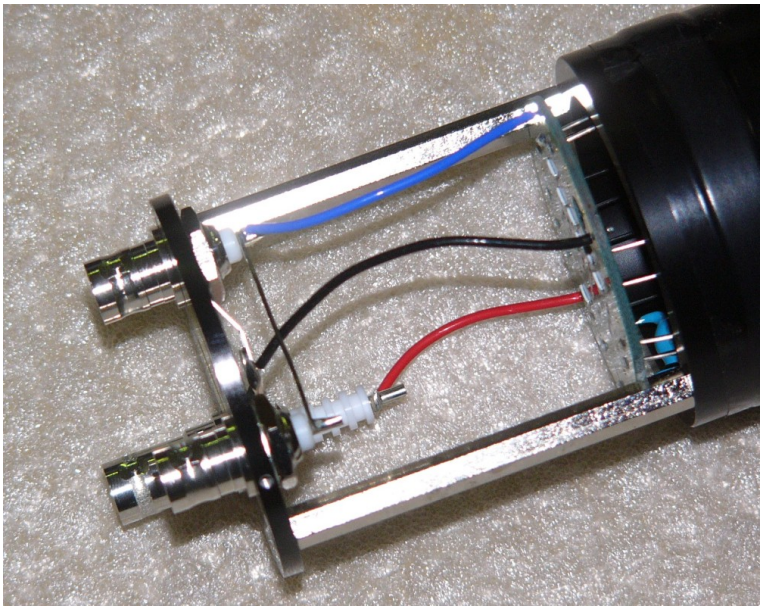


図 6.4: Voltage Divider：アノード間をシールドしていない金属線でつないでいることが確認できる

6.3 VETO 検出器部のテスト

6.3.1 目的

架台に設置する前に VETO 検出器のモジュール 1 つについて時間分解能の評価を行うことを目的として実験を行った。さらに VETO 検出器に接着した状態で光電子増倍管の電圧に対する特性曲線を調べた。

6.3.2 実験方法

架台に設置する前の時点で東京工業大学大岡山キャンパス南 5 号館 554 室において VETO 検出器を水平に置き (実際の NEBULA での設置の仕方とは異なる) 実験を行った。

図 6.6,6.7 のように VETO の両端の光電子増倍管を ch5,6 と設定した。その上下には有感体積 $1 \times 3 \times 14$cm のプラスチックシンチレータ、両端に光電子増倍管を接着したものを上側を ch1,ch2, 下側を ch3,ch4 と設定、3×14cm の面を VETO と平行にセットし、宇宙線を測定した。この ch1,2,3,4 を動かしてコインシデンスをとることで VETO の任意の位置での測定が可能である。回路図は図 6.5 に、SCALER の INPUT の対応は表 6.1,6.2 に示す。光電子増倍管の印加電圧は表 6.3 の値で固定した。

6.3.3 時間分解能

ch1〜6 全てのコインシデンスをとった状態で約 30 時間データを収集した。得られた TDC スペクトルにゲートをかけてバックグランドを除去した後、スルー補正を行い、ガウス分布でフィットした。フィット結果より時間分解能 σ を求めた結果が図 6.8 である。

また、カウントレートは 5.38×10^{-2} cps ~ 3 count/min であった。

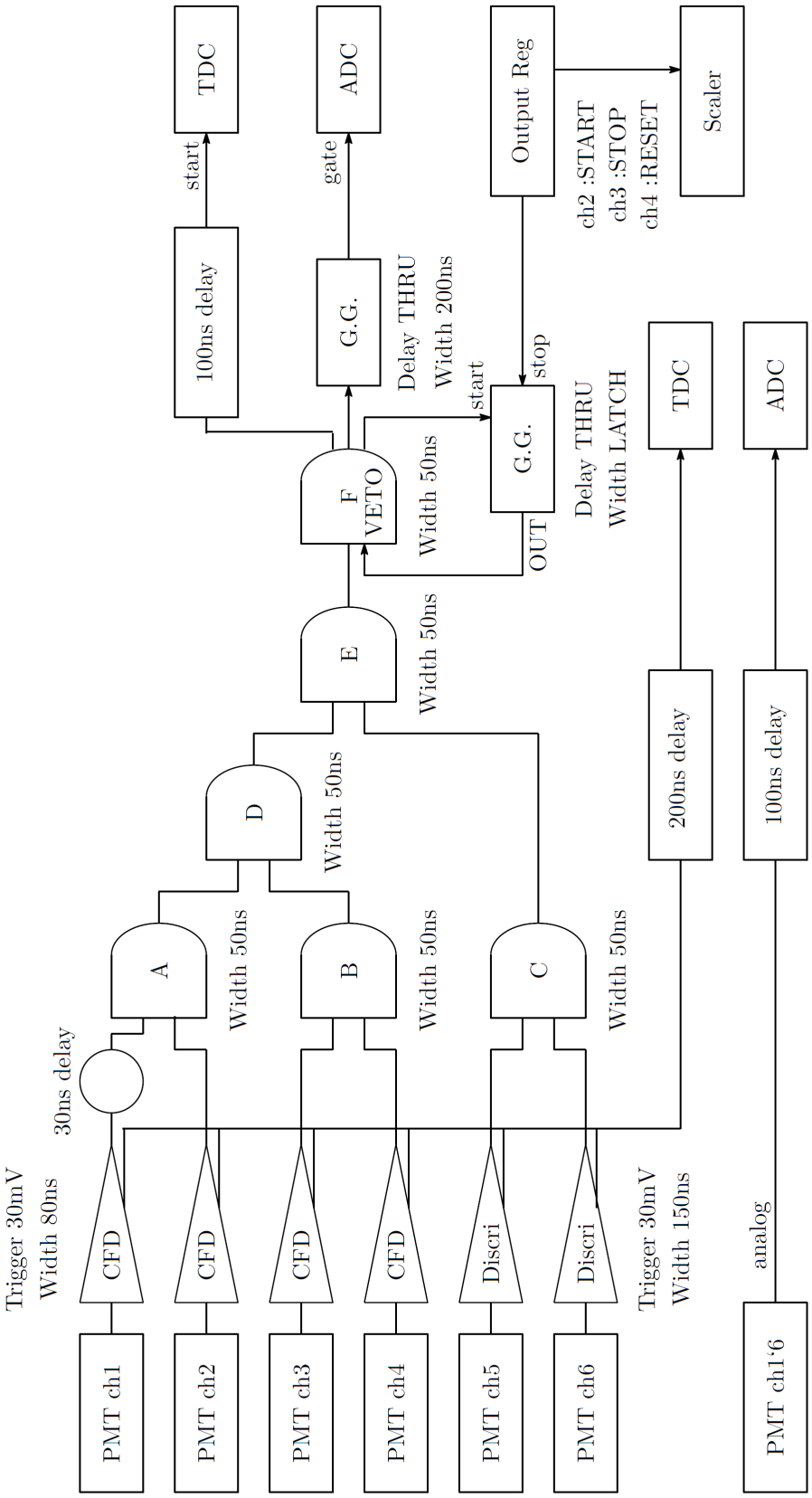


図 6.5: VETO 検出器部のテストの回路図

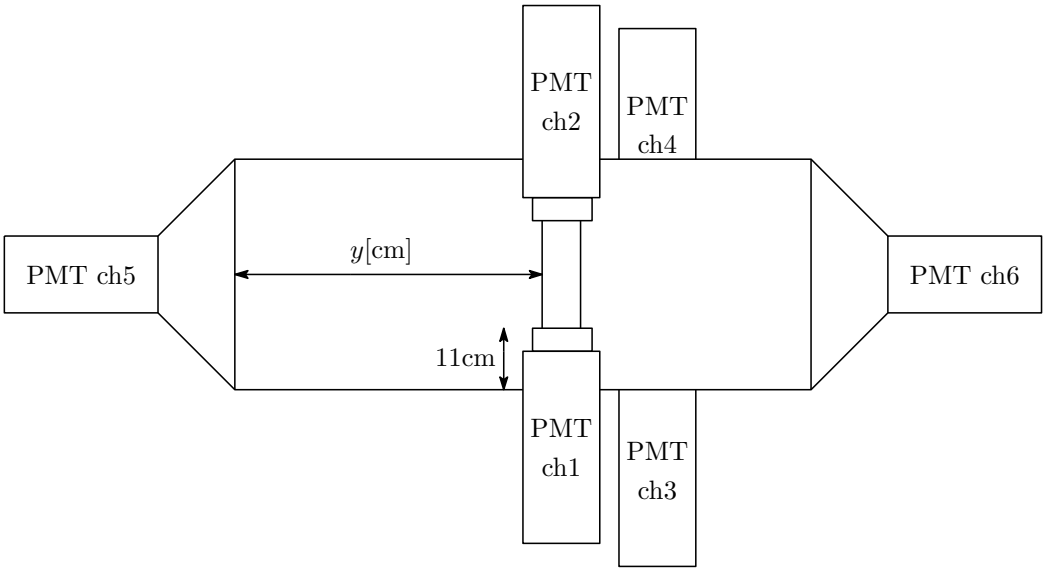


図 6.6: VETO 検出器部のテストのセットアップ (上面)

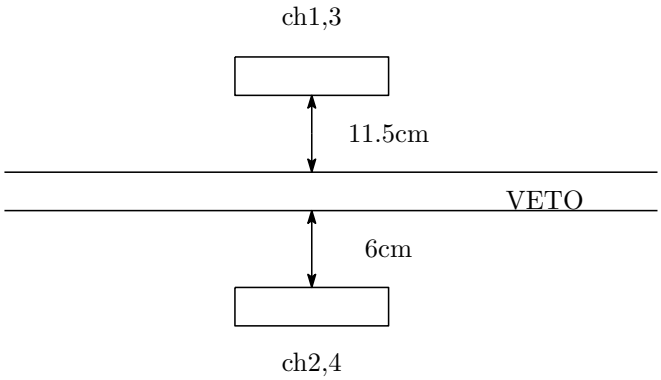


図 6.7: VETO 検出器部のテストのセットアップ (側面)

6.3.4 光電子増倍管の特性曲線

PMT ch5,6 ならびに ch1,2,5,6 のコインシデンスをとったものについて印加電圧を 800V から 1700V まで 50V 刻みで変えていき、その時の宇宙線のカウントレート [cps] を SCALER により計測した。各電圧に対し、4 分程度測定を行ったが、800V から 900V の範囲ではカウントレートが低すぎた為、計測不能であった。ch1,2 の位置は $y = 122$[cm] で固定した。結果を図 6.9 に示す。

	16ch SCALER
ch1	0
ch2	1
ch3	2
ch4	3
ch5	4
ch6	5
D(ch1⊗ch2⊗ch3⊗ch4)	6
C(ch5⊗ch6)	7
E(ch1⊗ch2⊗ch3⊗ch4⊗ch5⊗ch6)	8
F(ch1⊗ch2⊗ch3⊗ch4⊗ch5⊗ch6)	9

表 6.1: 16ch SCALER INPUT (VETO 検出器部のテスト)

	Visual SCALER
D(ch1⊗ch2⊗ch3⊗ch4) OVERLAP	1
C(ch5⊗ch6)	2
E(ch1⊗ch2⊗ch3⊗ch4⊗ch5⊗ch6)	3
G.G. (Delay THRU, Width 100ns)	4

表 6.2: Visual SCALER INPUT (VETO 検出器部のテスト)

PMT	HV[-V]
ch1	1490
ch2	1570
ch3	1630
ch4	1820

表 6.3: 光電子増倍管の印加電圧 (VETO テスト)

PMT	時間分解能 [psec]
ch5	468.5 ± 8.3
ch6	442.7 ± 6.9

図 6.8: VETO 検出器部の時間分解能

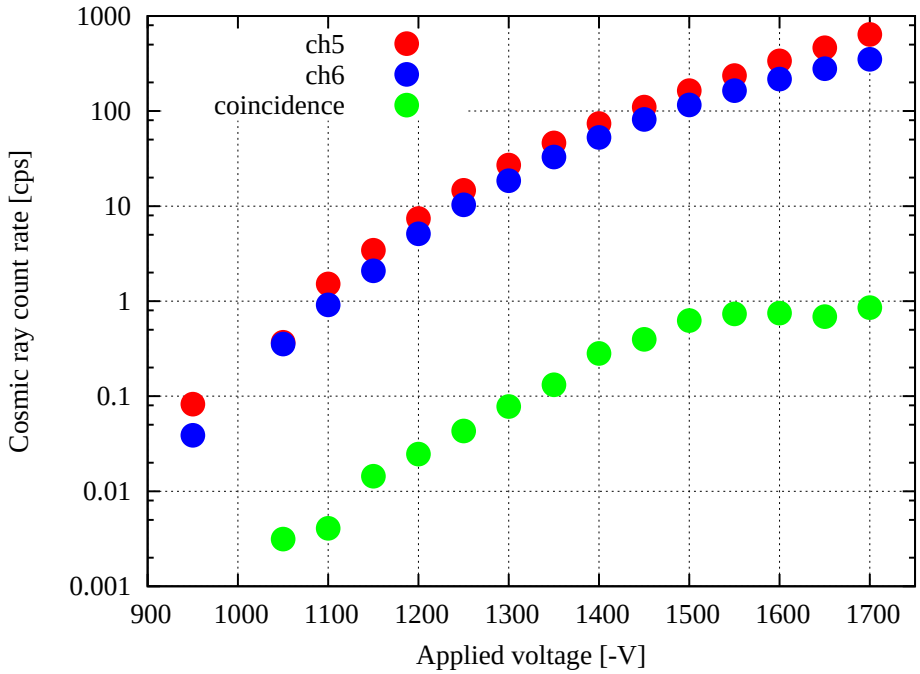


図 6.9: 光電子増倍管の特性曲線： 横軸:印加電圧 [-V]　縦軸： 宇宙線のカウントレート [cps]　赤： ch5、青： ch6、緑： ch1⊗ch2⊗ch5⊗ch6

6.4　NEBULA での宇宙線の観測

6.4.1　目的

現在 NEBULA のデータ収集システム (DAQ) は立ち上がっていない。その為、詳細なデータを取得することはできていない。そこで、第一段階として DAQ を使わないオシロスコープによる宇宙線の信号の観測により中性子検出器部と VETO 検出器部のテストを行った。

また、Visual Scaler による宇宙線のカウントレートの計測を行い、中性子検出器・VETO のテストならびにシミュレーションとの比較を行った。

6.4.2　実験方法

まず、オシロスコープにより中性子検出器 101,102,103,104、VETO101,102 のシグナルを観測した。このうち、中性子検出器 102(N102 と表記。以降同様) と N103 については上部光電子増倍管が脱落しかかっており、一度ライトガイドから外してオプティカルセメントを用いて接着し直した。その接着ならびに遮光のテストも兼ねている。さらに、N101 と VETO101(V101 と表記。以降同様) のコインシデンスをとって 60 秒間宇宙線の計測を行った。この際、Discriminator のスレッショルドの設定は 12mV,30mV と二種類設定し、それぞれ 2 回、3 回の計測を行った。

6.4.3　実験結果

波形

図 6.10 に N102 の、6.11 に N103 のオシロスコープで観測した波形をそれぞれ示す。これらは光電子増倍管を接着し直した中性子検出器の波形である。セカンドピークが確認できるが、光はシンチレータ中で 1m 進むのに 5ns 程度かかるので主要なピークの約 20ns 後 (≃ 4m、ほぼ中性子検出器の縦の長さに相当) に現れているセカンドピークは中性子検出器中のライトガイドでの光の反射と考えられる。

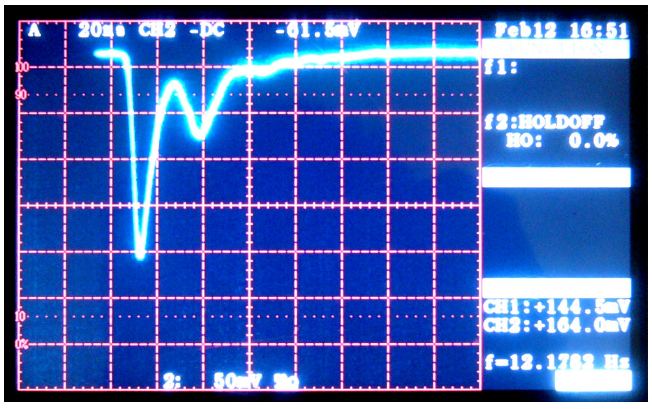


図 6.10: 中性子検出器 102 の波形：横軸 1 目盛 20ns、縦軸 1 目盛 50mV

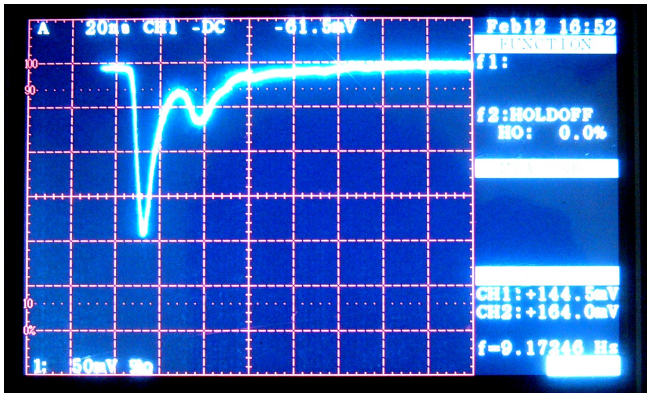


図 6.11: 中性子検出器 103 の波形：横軸 1 目盛 20ns、縦軸 1 目盛 50mV

図 6.12 に N104 の波形を示す。静止画では分かりにくいが、ライトで下部から光を照らすと明らかに波形に変動が見られた。光漏れが起こっていると考えられる。

さらに図 6.13〜図 6.15 に N101 の波形を示す。やはり、静止画では判断しにくいが明らかに N102 や N103 に比べ波形が汚かった。

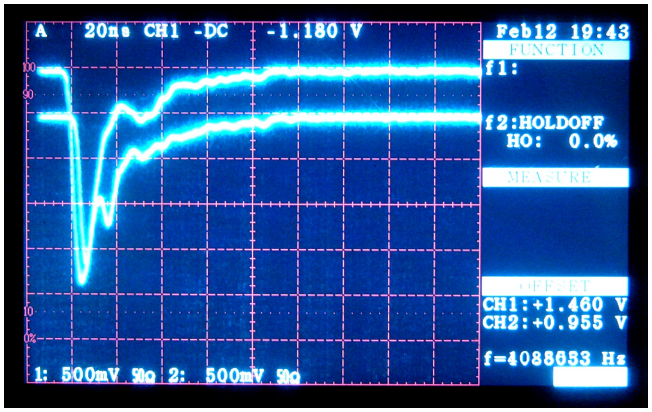


図 6.12: 中性子検出器 104 の波形：横軸 1 目盛 20ns、縦軸 1 目盛 500mV

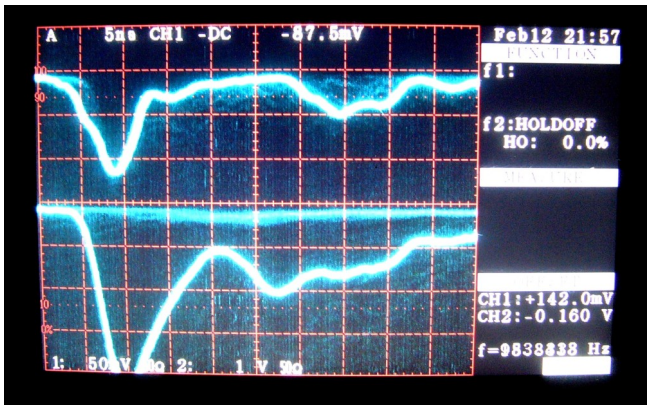


図 6.13: 中性子検出器 101 の波形 (a)：横軸 1 目盛 5ns、縦軸 1 目盛 CH1:50mV, CH2:1V

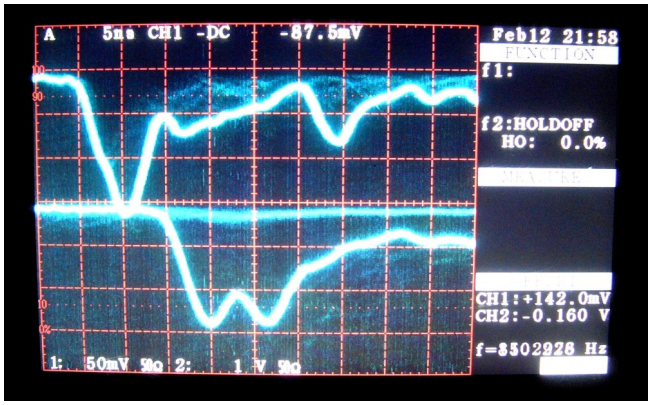


図 6.14: 中性子検出器 101 の波形 (b)：横軸 1 目盛 5ns、縦軸 1 目盛 CH1:50mV, CH2:1V

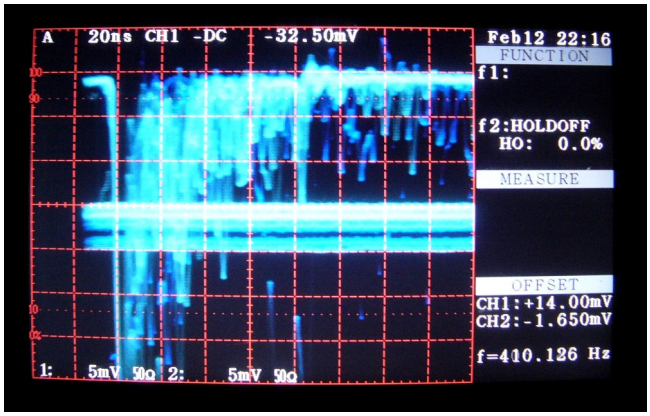


図 6.15: 中性子検出器 101 の波形 (c)：横軸 1 目盛 20ns、縦軸 1 目盛 5mV

波形が汚い原因を探るため、周りを暗くした後、光を当てて光漏れの箇所の発見を試みた。だが、現状では光に対し過敏に反応する箇所を発見できていない。さらに γ 線源を当てたときのピークの高さは汚い波形のものに近かった。このことから、宇宙線のピークが明確に見えず、ノイズが多く見られるのはコンクリートなどから放出される自然放射線等が原因として挙げられる。しかし、今回行ったオシロスコープによる簡単なテストだけからではこれ以上の詳細に迫ることは難しく、原因の完全な特定には至っていない。原因の特定と改善は今後の課題である。

カウントレート

表 6.4 にそれぞれのスレッショルド設定におけるカウントレートの平均値を示す。

スレッショルド mV	V101 [cps]	N101 [cps]	N⊗V [cps]
12	89	732	6.2
30	87	244	4.8

表 6.4: NEBULA での宇宙線のカウントレート：N⊗V は中性子検出器と VETO のコインシデンスを表す。

この結果に対する議論はセクション 6.5.5 で行う。ただし、前述したように宇宙線以外にもバックグラウンドとして他の自然放射線を拾っている可能性がある。そこでセクション 6.5.5 ではスレッショルドを 30mV と設定した時の結果をこの実験で得られた結果とみなして議論を行う。

6.5 シミュレーションの評価実験

6.5.1 目的

第 4 章、第 5 章で述べたシミュレーターについてその妥当性を検証するためにプラスチックシンチレータを用いて宇宙線の測定を行った。

6.5.2 実験方法

この実験は NEBULA そのものではなく、東京工業大学大岡山キャンパス南 5 号館 554 室において 3 つのプラスチックシンチレータを用いて行った。うち 2 つは NEBULA の開発のために試作されたプロトタイプ検出器である。表 6.5 に NEBULA で実際に使われている中性子検出器部のモジュールとプロトタイプ検出器の仕様を比較して示す。多少の違いはあるもののほぼ同じシンチレータであり、NEBULA での実際の運用にあたって重要な資料になることが期待される。

	NEBULA	中性子検出器’	VETO’ A
素材	BC-408	EJ-200	EJ-200
高さ [cm]	180	10	10
幅 [cm]	12	180	180
奥行き [cm]	12	12	12
光電子増倍管 1	R7724	R7724	無し
接着方法	オプティカルセメント	オプティカルグリス	(遮光)
光電子増倍管 2	R7724	H6559	H7195
接着方法	オプティカルセメント	オプティカルセメント	オプティカルセメント

表 6.5: NEBULA の中性子検出器部とプロトタイプ検出器の比較

ここで、便宜上この 2 つのプロトタイプ検出器のうち 1 つを中性子検出器’ と呼称し、NEBULA における中性子検出器と同じ役割を果たすものとする。さらにもう一方を VETO’ A と呼称し、NEBULA における VETO と同じ役割を果たすものとする。

3 つ目のプラスチックシンチレータは大きさが 10cm×11cm×1mm のプラスチックシンチレータの両端にライトガイドを介して計 2 つの光電子増倍管を接着したものである[*4]。これを VETO’ B と呼称する。

もともと今回のシミュレーターは NEBULA を念頭において開発したものであり、VETO の厚さが 1cm であるため、この厚さを無視している。そのため、VETO’ A では厚さが 12cm になるため、入射宇宙線に対して厚さの効果が無視できなくなる可能性がある（対して、NEBULA の場合には VETO の厚さが 1cm と薄いことに加え、平行に置かれた VETO と中性子検出器のコインシデンスという条件設定の下では厚さの効果はほぼ無視できると考えられる）。そこで、VETO’ B は有感領域が小さく統計が少なくなることが予想されるものの敢えて使用した。

[*4] これは元々 2009 年 7 月に RIPS を用いて行われた ^{24}O の励起準位探索の実験 r405n [20] のために設計・製作したものである。現在は実験に使われていない。

これら 3 種類のプラスチックシンチレータを用いて 2 つのセットアップで実験を行った。実験に用いた回路を図 6.22 に示す。

PMT	HV[-V]	
	VETO' A	VETO' B
ch1	1550	1557
ch2	1550	1551
ch3	-	1550
ch4	1400	1365

表 6.6: 光電子増倍管の印加電圧 (シミュレーション評価実験)

VETO' A

中性子検出器' と VETO' A を高さを揃えて 10cm 離し、平行に置いた (図 6.21)。この際、鉛直方向を 10cm の面として横置きとした (VETO のテストと同様置き方は NEBULA と異なる)。中性子検出器' は表 6.5 のように両読みであるが、VETO' A は片読みとした。

図 6.16: シミュレーション評価実験のセットアップ (VETO' A) : 奥が中性子検出器'、手前が VETO' A である。

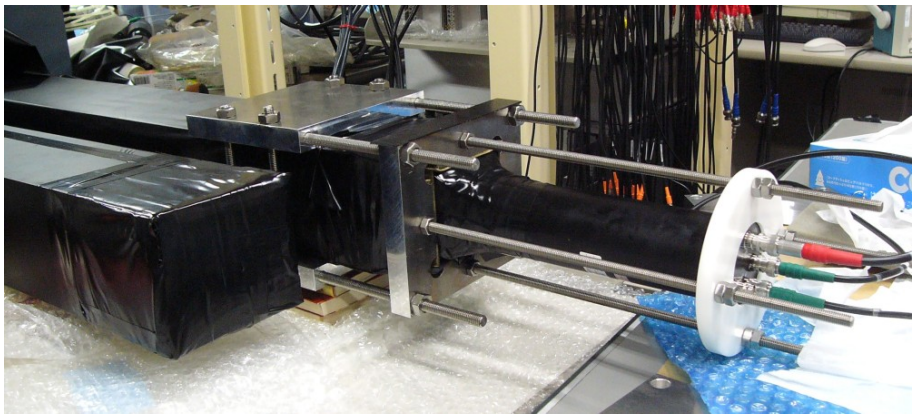


図 6.17: シミュレーション評価実験のセットアップ (VETO' A) : 中性子検出器'(奥) は R7724 をオプティカルグリスで接着。VETO' A(手前) は遮光。反対側は中性子検出器' は H6559 を、VETO' A は H7195 をオプティカルセメントで接着。

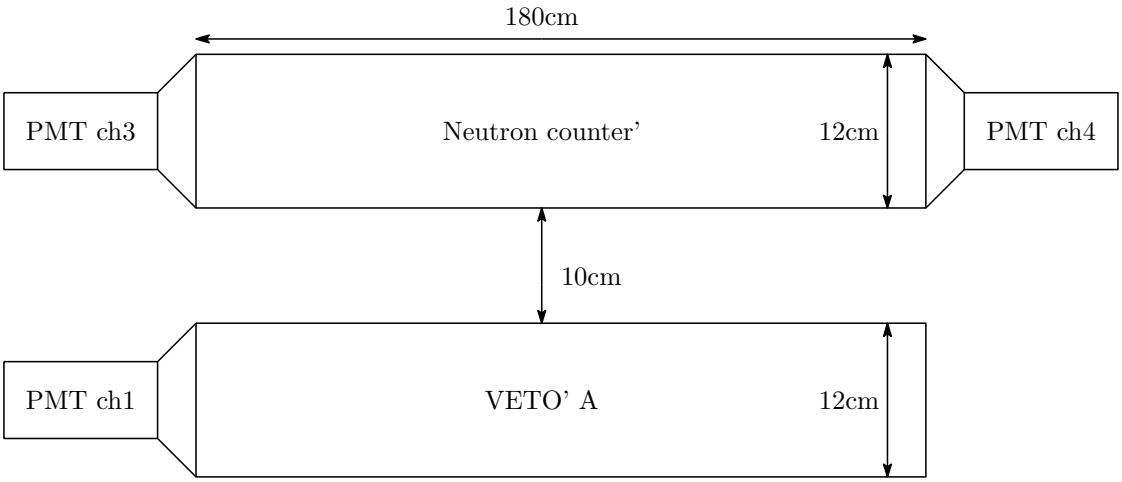


図 6.18: シミュレーション評価実験のセットアップ (VETO' A) top view：奥が中性子検出器'、手前が VETO' A である。両者の高さを揃えて 10cm 離し、平行にセットした。

VETO' B

中性子検出器' と VETO' B を 15cm 離して平行に置いた (図 6.21)。この際、鉛直方向を 10cm の面として横置きとした (やはり置き方は NEBULA と異なる)。

図 6.19: シミュレーション評価実験のセットアップ (VETO' B)：奥が中性子検出器'、中央が VETO' B である。手前に見えている VETO' A はこのセットアップでは使用していない。

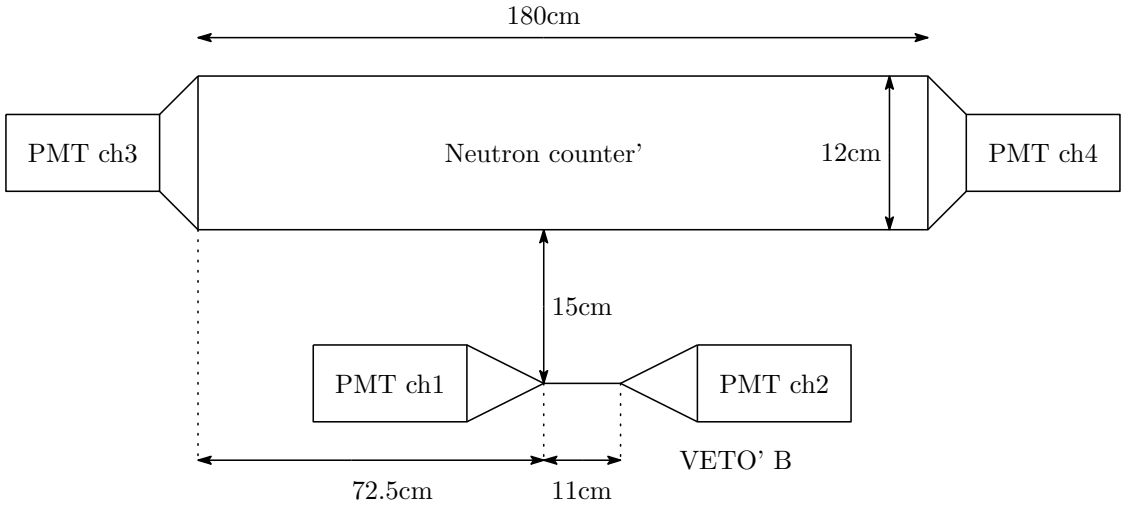


図 6.20: シミュレーション評価実験のセットアップ (VETO' B) top view: 奥が中性子検出器'、手前が VETO' B である。

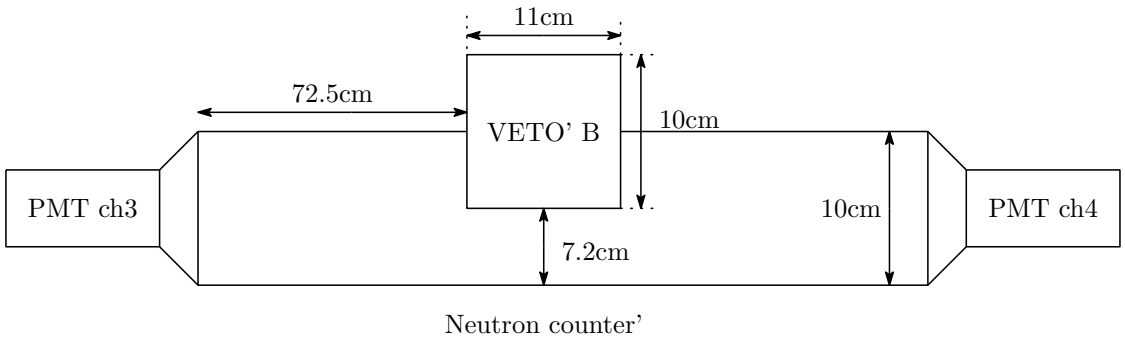


図 6.21: シミュレーション評価実験のセットアップ (VETO' B) side view: 奥が中性子検出器'、手前が VETO' B である。この図では VETO' B のライトガイド・光電子増倍管を省略しシンチレータ部のみ描いている。

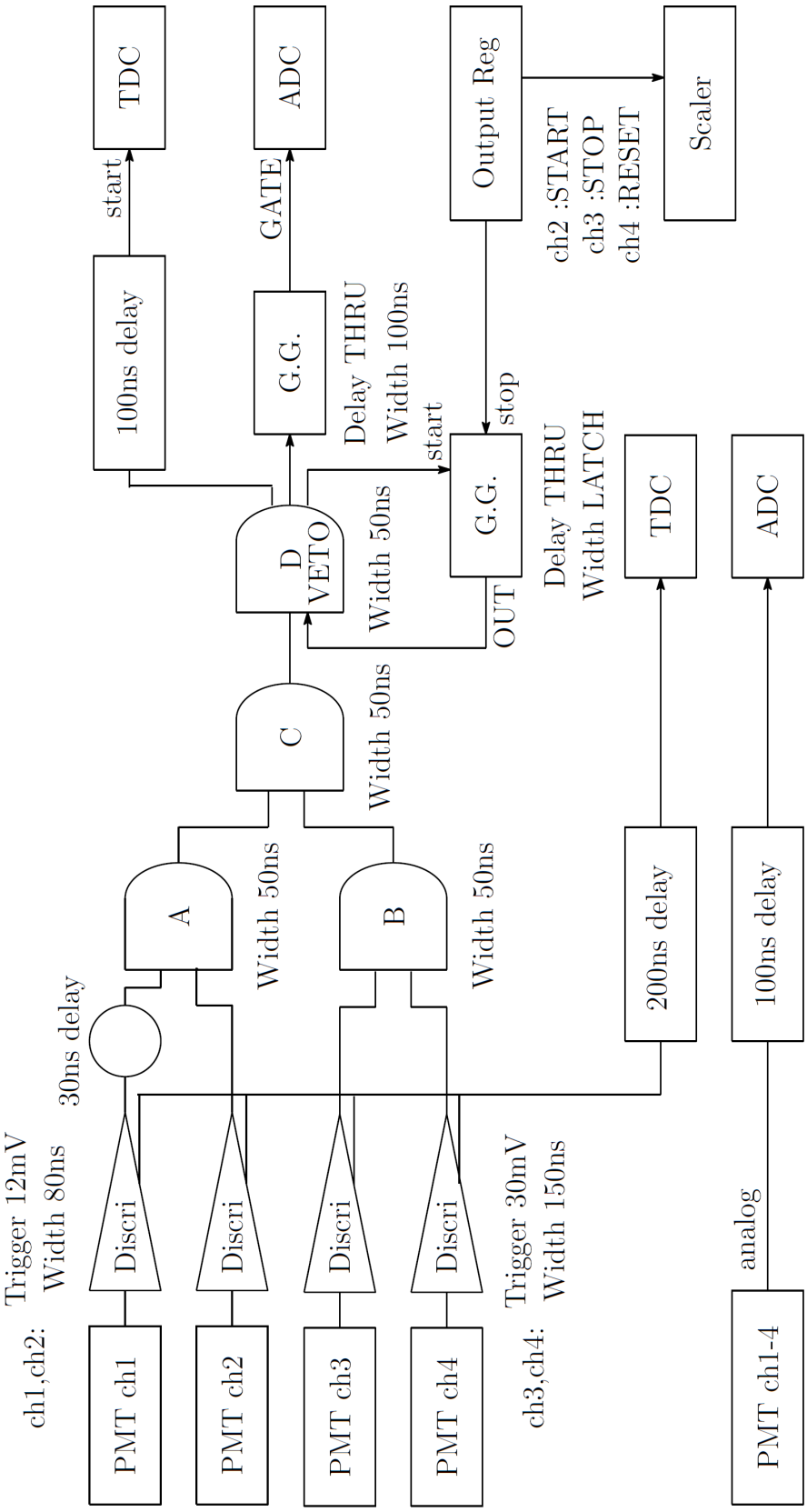


図 6.22: シミュレーション評価実験の回路図

	16ch SCALER	Visual SCALER
ch1	0	
ch2	1	
ch3	2	
ch4	3	
Coincidence A (ch1⊗ch2)	4	1
Coincidence B (ch3⊗ch4)	5	2
Coincidence C (ch1⊗ch2⊗ch3⊗ch4)	6	3
Coincidence D (ch1⊗ch2⊗ch3⊗ch4)	7	
G.G. (Delay THRU, Width 100ns)	8	
G.G. (Delay THRU, Width LASTCH)	9	

表 6.7: SCALER INPUT (シミュレーション評価実験)

6.5.3 解析

VETO' A を使って得られた中性子検出器' の ADC スペクトルの解析を行った。一方、VETO' B では統計が少なく明確なピークを得ることができなかったので、ADC スペクトルの解析は行わず、スケーラーによるカウントのみをセクション 6.5.4 で示す。

まず、得られた ADC スペクトルに対してペデスタル補正[*5]を行った。次いで、200ch 付近に現れた宇宙線によるものと考えられるピークに対しランダウ分布によるフィットを行った。このピーク値とシミュレーションで得たピーク値を合わせることでエネルギー較正とした。

6.5.4 実験結果

スケーラーによるカウントの値とカウントレートを表 6.8 に示す。

	VETO' A		VETO' B	
	[count]	[cps]	[count]	[cps]
VETO'	161025615	518	154498	1.8
中性子検出器'	85032992	273	25042086	296
VETO' ⊗ 中性子検出器'	1454779	4.7	6950	0.082
測定時間 [s]	311041		84665	
測定時間 [hour]	86.4		23.5	

表 6.8: シミュレーション評価実験 カウントレート

[*5] 詳細はセクション C.4 参照

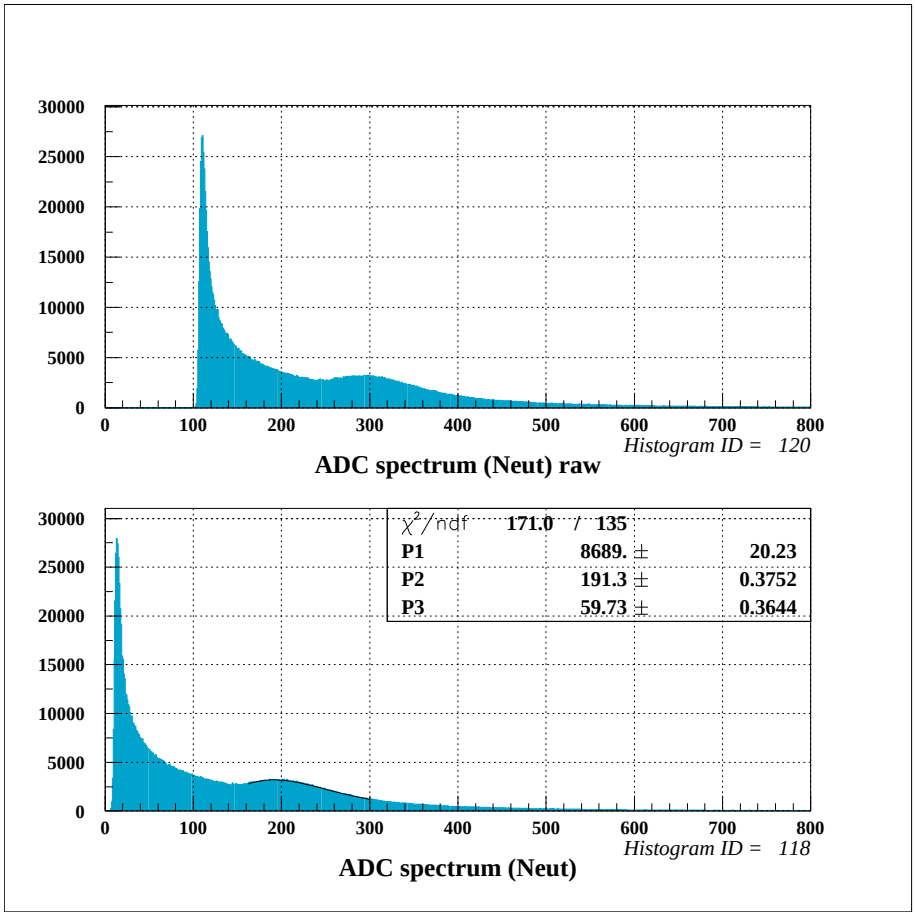


図 6.23: 上段:得られた ADC スペクトル 下段:上段をペデスタル補正後、ランダウ分布によりフィット。P2 がランダウピークの ch 数を示し、この場合 191ch である。

6.5.5　考察

カウントレート

シミュレーションでは地上に設置したと仮定したときの NEBULA でのカウントレートとコンクリート・土壌の補正後、理化学研究所の地下に設置された実際の NEBULA でのカウントレートの比を与える。そこで地上でのミューオンのフラックスをデータとして入力する必要がある。今回はそのデータを二種類用意した。一つは VETO' B の実測値[*6]を元に面積比から VETO でのカウントレートに変換した値である。もう一つは一般的な宇宙線の経験式から VETO でのカウントレートを計算した値である[*7]。これら二つのデータを元にシミュレートした NEBULA のカウントレートを表 6.9 に示す。さらに VETO' B と NEBULA の VETO でのカウントの比をとることで実測値としこれも表 6.9 に示した。

表 6.9 に示されたように実験結果から 87% 地下へ透過していると言える。一方でシミュレーションでは地下を透過し NEBULA に到達するのは 25% となっている。その結果カウントレートには VETO' B をもとにした場合 3 倍程度

[*6] VETO' B は建物の最上階での実測値であるため、これをコンクリートの影響の無い地上での値と見なす。また VETO' A は厚みによる誤差が大きくなるので今回は採用しなった。

[*7] セクション B.9 参照

	実測値		シミュレーション	
	NEBULA	VETO' B	VETO' B	経験式
地上 [cps]	-	100	100	67
地下 [cps]	87	-	25	17
地下への透過率 [%]	87		25	25

表 6.9: カウントレートの比較

の差が生じている。また、経験式を元に算出した場合、そもそも地表の時点で地下での実測値を下回る結果となった。

ただし、セクション 6.4.3 で述べたように NEBULA での測定結果には宇宙線だけでなくその他の自然放射線を拾っている可能性がある。また、ADC スペクトルの項で述べるように VETO' A や VETO' B を用いた測定でも宇宙線以外の自然放射線を拾っていると考えられる。したがって、ここで表 6.9 に示したカウントレートは相当の誤差が含まれる。よって、現段階では定量的な議論は難しいが、その傾向を述べる。まず、シミュレーションでは実測値に比べコンクリート・土壌の補正を過剰に評価し実態以上に粒子数が減少する傾向が見られる。一方でその差は実測値と比較して高々数倍に収まっており、オーダーレベルでの差は認められない。また、最終的な目標とするエネルギー較正の観点からすると、セクション 5.6.1 で論じたように粒子数の減少の効果はエネルギー損失分布のピークにほとんど寄与が無いと言えるためこの粒子数の見積もりの差はほぼ問題にならないと言える。

ADC スペクトル

VETO' A を用いた実験により得られた中性子検出器' の ADC スペクトルに対しセクション 6.5.3 で述べた解析を行った後、シミュレーション結果と重ねたヒストグラムが図 6.24 である。

カウントレートの項で述べたようにカウントレートの見積りが困難であった。そのためシミュレーターでは本来は測定時間を入力としてカウントが出力されるべきであるが、現時点ではそこまでの段階に至ってはいない。そこで、今回はスペクトルの形状の比較を行うことを目的として、実験結果のピークのカウントからシミュレーターでの粒子生成個数を逆算して強制的に縦軸をスケーリングした。

まず、実験結果では 2MeV 付近にシミュレーション結果と大きく食い違う鋭いピークが見られる。この原因は未だ特定できていないものの宇宙線以外の自然放射線によるバックグランドを拾っている可能性が挙げられる。

過去に今回用いたプロトタイプ検出器を利用して宇宙線の測定が行われている [19]。過去の測定では今回とセットアップが異なり、プロトタイプ検出器の上下に有感面積 3×14cm のプラスチックシンチレータを配置し、計 3 個のシンチレータのコインシデンスを取るという厳しいコインシデンス条件の下で測定が行われた[*8]。さらにセクション 5.2 でも述べたように宇宙線の強度は $\cos^2\theta$ に比例することが知られており、水平方向よりも鉛直方向の強度の方が強い。そのため上下方向の宇宙線を計測した過去の測定では宇宙線のカウントレートが多くなりバックグランドに対して強い測定と言える。

逆に今回行った測定では大型のシンチレータ 2 個のコインシデンスというバックグラウンドを比較的拾いやすい弱いコインシデンス条件であり、かつ、強度の弱い水平方向の宇宙線の計測を行った。そのため過去の測定に比べバックグラウンドに弱く、宇宙線以外の自然放射線を計測している可能性が疑われる。その結果図 6.5.5 の低エネルギー領域にシミュレーターでは想定していない自然放射線による鋭いピークが見られている可能性がある。

次に 32MeV 付近のピークの形状がシミュレーションと実験結果で異なる点について述べる。

[*8] 過去の測定のセットアップはセクション 6.3 において VETO の代わりにプロトタイプ検出器をセットしたものである。

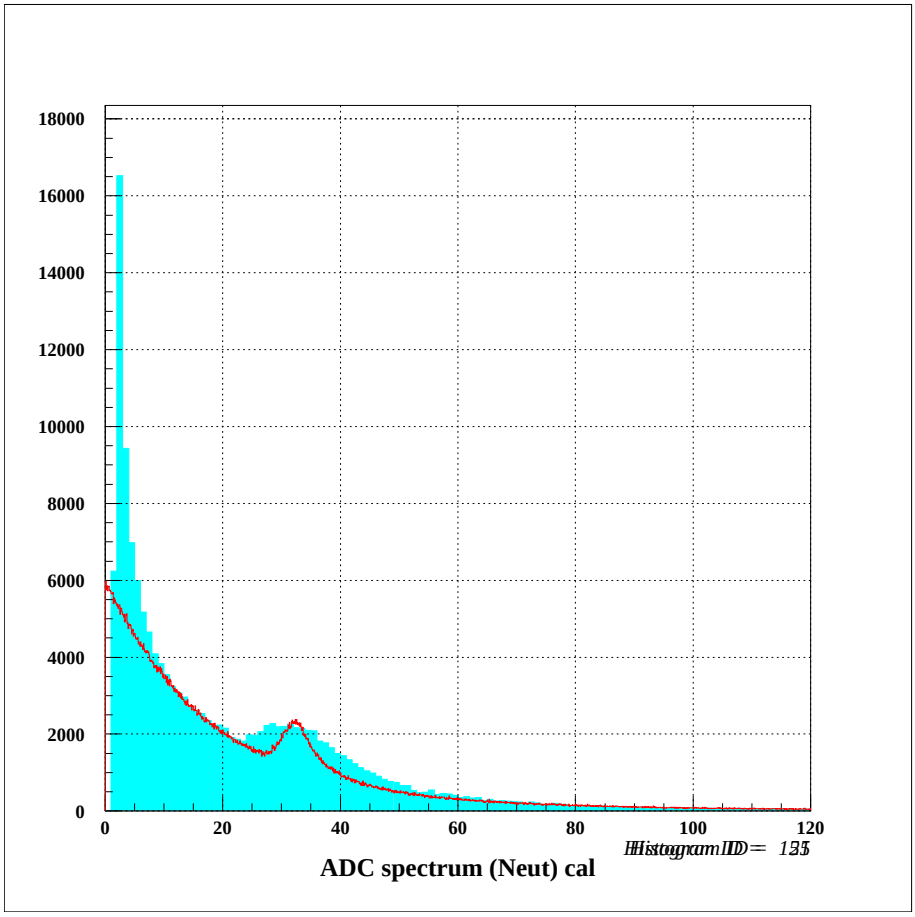


図 6.24: 中性子検出器' の ADC スペクトル (青) シミュレーション結果 (赤線) 横軸:エネルギー損失 [MeV] 縦軸:カウント

シミュレーションでは分解能や検出効率その他を考慮に入れていない理想的なエネルギー損失分布を結果として出力する。一方で、測定の精度には限界があり、理想的な分布に比べピークはよりなまる方向で測定される。現時点ではそのなまり具合について定量的な議論を行うことは難しいが、その傾向は上記のように理解できる。

以上、

- 縦軸については強制的なスケーリングを行っている
- 2MeV 付近に実験結果にのみ大きく鋭いピークが見られる
- 32MeV 付近のピークがシミュレーション結果と実験結果で異なる

この三点は考慮しなければならないものの上記のように説明することができ、逆にその他の点ではシミュレーションは実験結果をよく再現していると言える。定量的な評価を下すことは難しいが、定性的には実験結果の再現に成功したと評価できる。

第 7 章

まとめと今後の展望

理化学研究所の新たな不安定核ビーム生成施設 RIBF で使用する大型中性子検出器 NEBULA の開発を行っている。現在は 1 スタック目の中性子検出器部 60 モジュール中 30 モジュールならびに VETO 検出器部 12 モジュール中 11 モジュールの設置作業と配線の一部が完了した。さらに第 1 段階のテストとして光電子増倍管の波形をオシロスコープにより観測した。

また、キャリブレーションのためのシミュレーターを開発、宇宙線のシミュレーションを行い、エネルギー較正に使用するためのエネルギー損失のピーク値を求めた。また、NEBULA とプロトタイプ検出器を使った実験との比較を行い、測定結果の再現に成功した。

今後も引き続き NEBULA の組み立て・ケーブリング作業を行う。エレクトロニクス部については未だほとんど手付かずであるので、実際の SAMURAI での運用を踏まえた回路の構築を行っていく。また、データ収集システム (DAQ) も立ち上がっていないのでデータ収集の環境整備を行う。さらに各種テストを行って、検出器としての運用に備える。

シミュレーターについては現段階ではコンクリートや土壌のパラメーターはあくまでも一般的な値を使っているだけである。そこでこれを理化学研究所の実態に則した値へと焼き直したいと考えている。さらに実測値と比べると粒子数が少なくなるという問題が未解決であるので、これを解決し、より正確な値を出力できるよう目指す。

Appendix.A　NEBULA

A.1　NEBULA の構成要素の詳細

NEBULA の各構成要素について詳述する。

A.1.1　プラスチックシンチレータ BC-408

表 A.1 に BC408 プラスチックシンチレータの仕様を、図 A.1.1 に放出スペクトル、各粒子に対する応答、レンジをそれぞれ示す [21]。

A.1.2　光電子増倍管 R7724

光電子増倍管部分の構成を内側より詳述する (図 A.2)。

光出力 (アントラセン比)	64%
上昇時間	0.9 ns
減衰時間	2.1 ns
パルス幅 (FWHM)	～2.5 ns
減衰長	210 cm
最大放出波長	425 nm
H 原子個数	5.23×10^{22} /cm3
C 原子個数	4.74×10^{22} /cm3
C : H	1:1.104
電子個数	3.37×10^{23} /cm3
ベース	ポリビニルトルエン
密度	1.032 g/cc
屈折率	1.58
線膨張率 (67 ℃)	7.8×10^{-5}
光出力温度依存性	60 ℃で 20 ℃に対し 95%
	-20 ℃～60 ℃の範囲で温度に対し独立
蒸気圧	真空で使用可能
溶解性	芳香族溶材、塩素、アセトンなどに対し溶解
	水、希酸、低級アルコール、シリコン溶液、グリス、アルカリに対し不溶

表 A.1: BC408 プラスチックシンチレータ 仕様 [21]

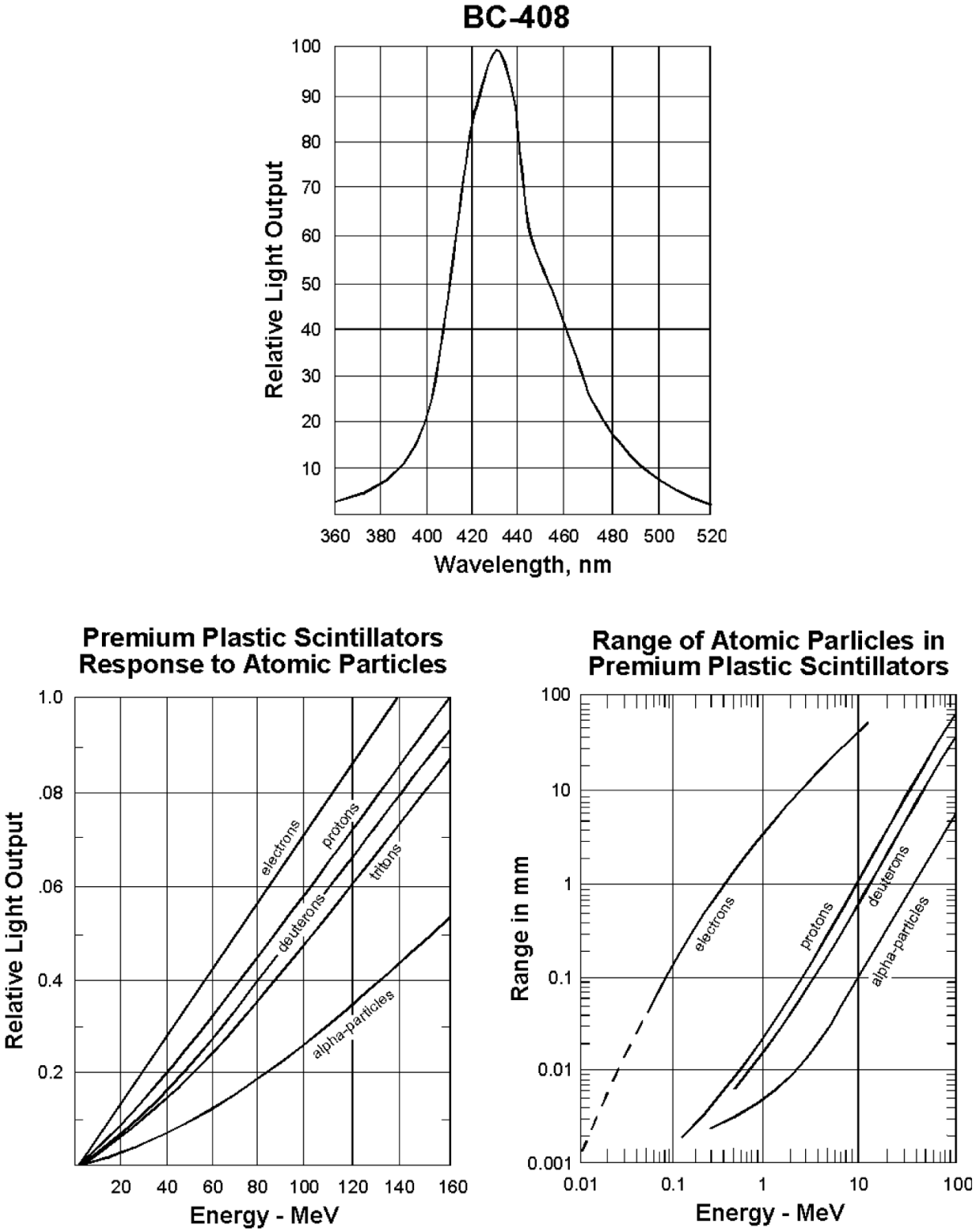


図 A.1: EJ200 プラスチックシンチレータ：(上) 放出スペクトル (左) 各粒子に対する応答 (右) 各粒子のレンジ [21]

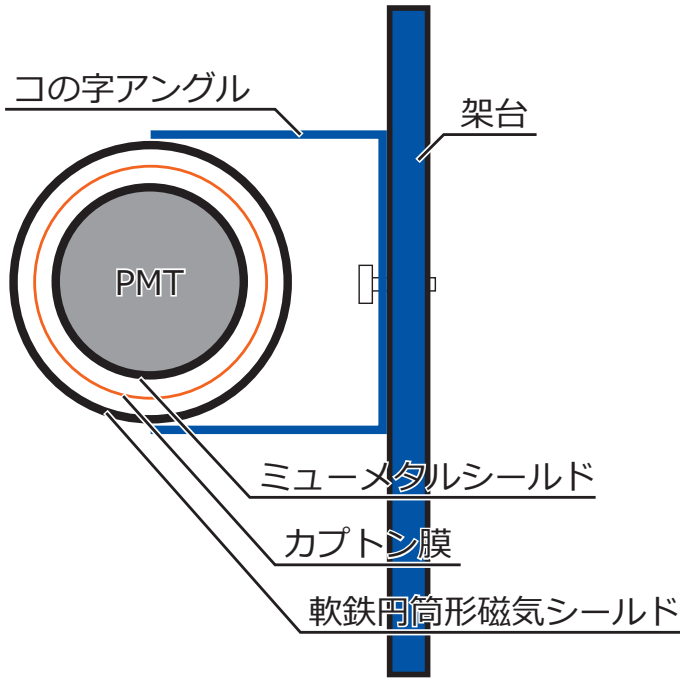


図 A.2: VETO 検出器部の光電子増倍管部分の構成と架台への保持方法： 光電子増倍管部分の構成は中性子検出器部と共通である

1. 一番内側に光電子増倍管と半田付け[*1]された Voltage Divider(図 A.3)
2. S/N 比[*2]向上のため Voltage Divider と光電子増倍管を覆う一体型の磁気シールド (ミューメタルシールド)(図 A.3)
3. ミューメタルシールドの外側に電気的に絶縁するためのカプトン膜
4. カプトン膜の外側に絶縁のため塗装を施した軟鉄円筒形磁気シールド (図 A.4)

以上が光電子増倍管部分について上下共通の構成である。

表 A.2 に光電子増倍管 R7724 の仕様を、表 A.3 に 25 ℃での特性を、図 A.5 に外形寸法とベースのダイアグラムを、図 A.6 に典型的なゲインを、図 A.7 に典型的なスペクトル応答をそれぞれ示す [22]。

A.1.3　遮光

厚さ 12μm のアルミナイズドマイラーをプラスチックシンチレータに二重に巻き、さらにその外側を黒ビニールシートでやはり二重に覆い遮光を行っている (図 A.8)。

A.1.4　架台

架台は SAMURAI 電磁石ピット下流に床面より高さ 2m のビームライン上に中性子検出器部と VETO 検出器部を保持することを目的としている。以下、その特徴を記す。

- 中性子検出器部 2 層と VETO 検出器部 1 層を保持する構造を持つ。

[*1] 信頼性向上のため半田付けがなされている
[*2] signal-noise ratio： 信号雑音比

図 A.3: 光電子増倍管 R7724、Voltage Divider、ミューメタルシールド

図 A.4: 軟鉄円筒形磁気シールド

種類	ヘッドオン型
管径	ϕ51 mm
受光面サイズ	46 mm
感度波長 (Short)	300 nm
感度波長 (Long)	650 nm
感度波長 (Peak)	420 nm
分光感度特性 カーブ No.	400K
光電面 種類	バイアルカリ
窓材質	硼硅酸ガラス
ダイノード構造	ライン
ダイノード段数	10
ベース	21-ピン ガラスベース
適合ソケット	E678-21C
動作時周辺温度	-30 〜 50 ℃
保管温度	-80 〜 50 ℃
(絶対最大定格) 陽極−陰極間電圧	2000 V
(絶対最大定格) 陽極−最終ダイノード間電圧	500 V
(絶対最大定格) 平均陽極電流	0.2 mA
陽極−陰極間 印加電圧	1750 V

表 A.2: 浜松ホトニクス R7724 仕様 [22]

		Min.	Typ.	Max.
陰極特性	ルーメン感度 (2856K)	60 uA/lm	90 uA/lm	-
	量子効率 (420nm)	-	26 %	-
	青感度指数 （CS 5-58）	-	10.5	-
	放射感度	-	85 mA/W	-
陽極特性	ルーメン感度 (2856K)	30 A/lm	300 A/lm	-
	放射感度	-	2.8×10^5 A/W	-
	ゲイン	-	3.30×10^6	-
	暗電流 (30 分後)	-	6 nA	40 nA
時間特性	上昇時間 (Tr)	-	2.1 ns	-
	電子走行時間	-	29 ns	-
	走行時間 (T.T.S.)	-	1.2 ns	-
パルスリニアリティ	（2% 変動）	-	60 mA	-
	（5% 変動）	-	90 mA	-

表 A.3: 浜松ホトニクス R7724 特性 (25 ℃)[22]

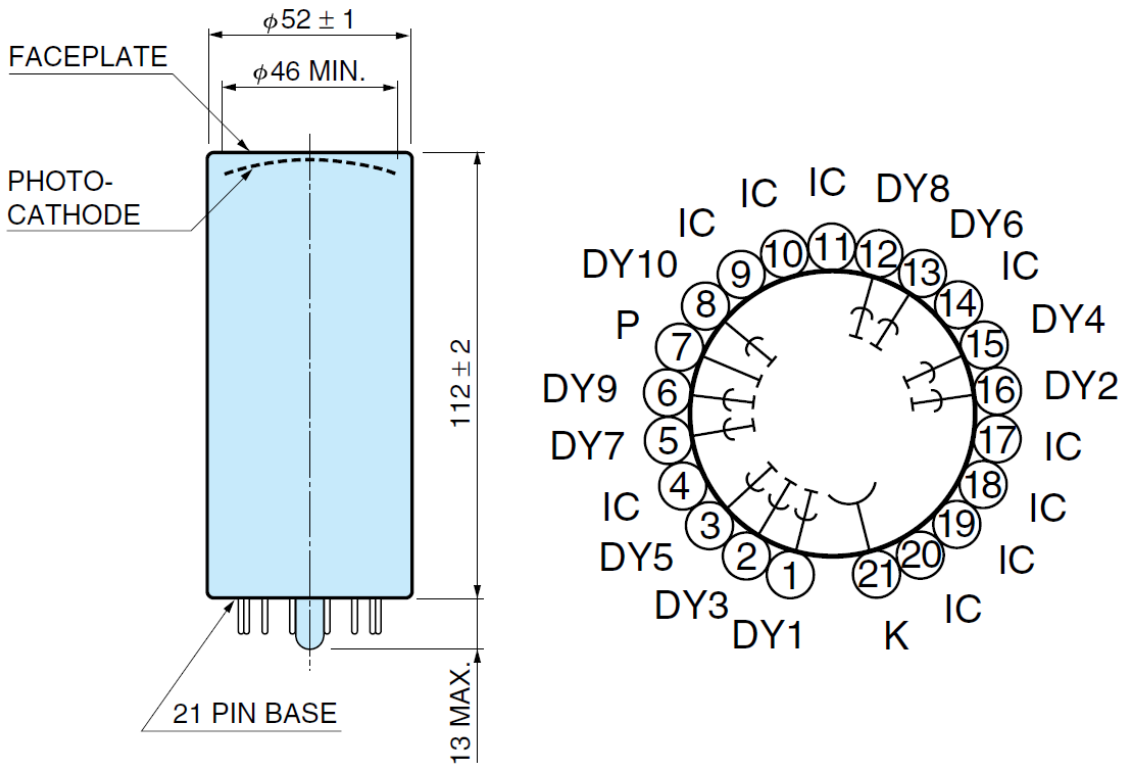


図 A.5: R7724 の外形寸法とベースのダイアグラム [22]

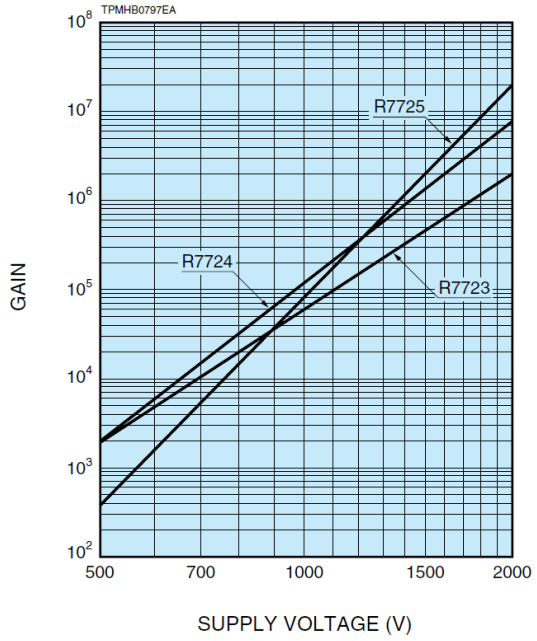


図 A.6: R7724 の典型的なゲイン [22]

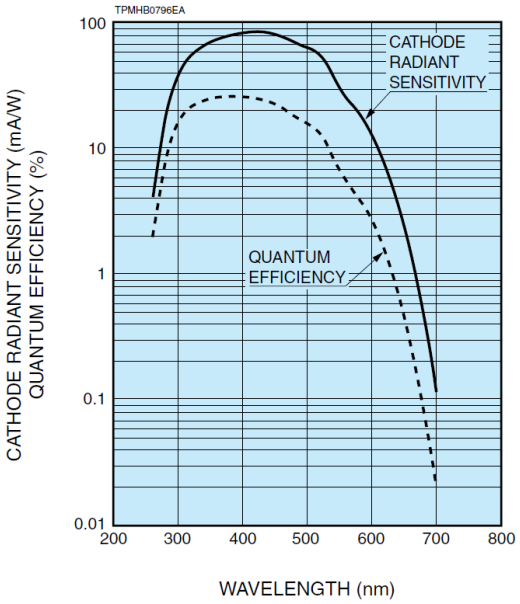


図 A.7: R7724 の典型的なスペクトル応答 [22]

図 A.8: ライトガイド、アルミナイズドマイラー、黒ビニールシート

- 検出器下部にディレイボックスが収納可能な 19 インチラックを持つ。
- 左右にはエレクトロニクス部を納める高さ 180cm の 19 インチラックを持つ。
- クレーンでつり上げて移動可能な金具を有する。
- アンカーボルトで床に固定できる構造を持つ。
- 架台全体に青色の防錆塗装を施している。
- 上下にケーブリング用の梯子状の金具を有する。

A.1.5 エレクトロニクス部

エレクトロニクス部の構成要素の概略を表 A.4、A.5 に示す。

種類	メーカー	型番	個数
QDC	CAEN	V792AC	14
TDC	CAEN	V775AC	14
Discriminator	CAEN	V895	26
VME crate	CAEN	VME8100/03	4
HV supplier main frame	CAEN	SY1527LC	1
HV supplier	CAEN	A1532	2
HV supplier	CAEN	A1932N	7
		SHV24-24chRadial52 変換	14
VME crate controller	GE Fanuc Intelligent Platforms	618-3	4
coincidence	Technoland	N-RS413	8
Logic FI/FO	Technoland	N-TM605	4
NIM 4ch latch	富士ダイアモンド	RIS-0780	2
TDC calibrator	富士ダイアモンド	RIS-0300	1
Cable Delay	林栄精器	16ch,500ns RG174-U	24
		Cable Delay with Attenuatur BOX	
ECL DELAY	林栄精器	16ch,500ns VME ECL DELAY	24
BNC-QLA パネル		80ch BNC-QLA パネル EIA:5U	8
NIM ビン電源	林栄精器	RPN-005-153	4
NIM cooling fan (2U)	林栄精器	REPIC RPN-330	4
NIM Logic Unit	Phillips Scientific	Quad Majority Model.756	2
VME インタラプト	林栄精器	RPV-130	4
I/O レジスター			

表 A.4: NEBULA のモジュール類の仕様

さらにエレクトロニクス部のモジュールならびにケーブル等の仕様の詳細を示す。

種類	メーカー	型番	個数
BNC-BNC ケーブル	HUBER+SUHNER	RG58C/U 8M	672
BNC-BNC ケーブル	HUBER+SUHNER	RG58C/U 6M	336
SHV-SHV ケーブル	HUBER+SUHNER	RG59B/U 10M	336
17 対フラット-16 個 lemo	HUBER+SUHNER	RG174/U*16 本ケーブル	24
QLA-QLA ケーブル	HUBER+SUHNER	RG174/U 1M	336
optical cable for SBS620		Model 15-103 5m	4

表 A.5: NEBULA のケーブル類の仕様

Packaging	1-unit wide 6U VME module
	(version AA requires the V430 backplane)
Inputs	32 channels, 50 Ohm impedance, negative polarity, DC coupling
Input range	0 ÷ 400 pC
	(if Sliding Scale is used FSR is reduced from 4095 to 3840 counts)
Resolution	12 bit
Gain	100 fC/count
Max. tolerated	15 mV
positive voltage input	
Reflections	$<$ 5% with 2 ns fall time input signals
Input offset	$\pm$ 2 mV
RMS Noise	0.5 counts typical
Integral non linearity	0.1% of FSR (=3840 counts)
	from 5% to 95% of FSR
Interchannel gain uniformity	$\pm$ 4%
Interchannel Isolation	$>$ 60 dB
Power rejection	0.002 count/mV (+5V); 0.01 count/mV (-5V)
	0.0046 count/mV (+12V); 0.0012 count/mV (-12V)
Fast clear time	600 ns
Gate timing	the Gate signal must precede the analog input by $>$ 15 ns
Conversion time	5.7 μs for all channels
Zero suppression	Treshold values programmable in:
	16 ADC counts steps over the entire FSR
	2 ADC counts steps over 1/8 of FSR
GATE/COM input	NIM signal, high impedance
	temporal window for current integration
Control inputs	active-high, differential ECL input signals:
	GATE: temporal window for current integration.
	RST: resets QAC sections, MEB status and control registers.
	VETO: inhibits the conversion of the QAC signals.
	FCLR: FAST CLEAR of QAC sections.
Control outputs	differential ECL output signals:
	DRDY: indicates the presence of data
	BUSY: board full, resetting, converting or in MEMORY TEST mode
VME interface	A24/A32
	Geographical Addressing
	Multicast commands
	D16/D32,BLT32/MBLT64,CBLT32/CBLT64

表 A.6: VME-V792 の仕様 [23]

Packaging	1-unit wide 6U VME module (version AA requires the V430 backplane)
Inputs	32 ECL inputs, 110 Ohm impedance
Resolution	12 bit
Full Scale Range	VME programmable from 140 to 1200 ns (if sliding Scale is used FSR is reduced from 4095 to 3840 counts)
LSB	VME programmable from 35 to 300 ps
RMS Noise	0.8 counts typical, 2 counts maximum
Integral non linearity	± 0.1% of FSR (measured from 5% to 95% of 3840 counts)
Differential non linearity	± 1% (measured from 5% to 95% of 3840 counts)
Interchannel Isolation	> 66 dB
Power rejection	0.01 count/mV (+5V); 0.02 count/mV (-5V) 0.005 count/mV (+12V); 0.001 count/mV (-12V)
Fast clear time	600 ns
Conversion time	5.7 μs for all channels
Minimum Start/Stop delay	Common Start mode: 14 ns Common Stop mode: 4 ns
Zero suppression	Threshold values programmable in: 16 ADC counts steps over the entire FSR 2 ADC counts steps over 1/8 of FSR
GATE COMMON input	Two LEMO 00 bridged connectors, NIM signal, high impedance Common Start/Stop signal
Control inputs	active-high, differential ECL input signals: RST: resets PEAK sections, MEB status and control registers VETO: inhibits the conversion of the peaks FCLR: FAST CLEAR of TAC sections COM: Common Start/Stop signal
Control outputs	differential ECL output signals: DRDY: indicates the presence of data BUSY: board full, resetting, converting or in MEMORY TEST mode
VME interface	A24/A32 Geographical Addressing Multicast commands D16/D32,BLT21/MBLT64,CBLT32/CBLT64

表 A.7: V775AC の仕様 [24]

Packaging	6U-high, 1U-wide VME unit
Inputs Channels	16 inputs, negative polarity, DC coupling
Inputs impedance	50 Ohm
Threshold range	-1 mV to -255 mV (-1 mV step)
Max input frequency	140 MHz (Updating mode); 80 MHz (Non Updating mode)
Max input voltage	-5 V
Reflections	$<$ 4% for input pulses of 2 ns rise time
Double Pulse Resolution	7 ns (Updating mode); 12 ns (Non Updating mode)
Test Input	NIM signal, high impedance; Min. FWHM: 5 nsMax. frequency: 60 MHz
Veto Input	NIM signal, high impedance; Min. FWHM: 15 ns
Outputs	16 ECL outputs with a fan-out of two
Output width	5 ns to 40 ns
Output Rise/Fall Time	$<$3 ns
Input/output delay	18 ns
Majority output	NIM logic signal; 50 ohm impedance
Or output	NIM logic signal; 50 ohm impedance
Current Sum output	-1 mA per hit, high impedance

表 A.8: V895 の仕様 [25]

Mechanics	8U bin for 6U x 160 mm VME cards, 21 slots, 2U space for fan tray
Backplane	VME64 J1/J2, VME64X J1/J2 - J1/J0/J2 Automatic daisy chain, CBLT compliant
Mains input	Auto range: 92 ÷ 264 Vac, 50 ÷ 60 Hz, inrush current: <16 A @ 230 Vac power. fact. > 0.98 @ Output Power > 1 kW
Maximum Total Output Power	1200 W @ 100 Vac 2530 W @ 211 Vac
Fuse	External 16 A, type B/C
Output power	110/220 A @ +5 V 20/40A @ +/-12 V 110/220 A @ +3.3 V
Isolation	CE acc. to EN 61010
Load Regulation	< 10 mV for 0-100% load change @ +5 V < 10 mV for 0-100% load change @ +3.3 V < 15 mV for 0-100% load change @ +/-12 V
Efficiency	75% ÷ 85% @ 230 Vac configuration dependent
Noise and ripple (backplane connector)	+5 V < 10 mVpp, <1 mVrms Typ: 4.0 mVpp, 0.5 mVrms +3.3 V < 10 mVpp, <1 mVrms Typ: 6.0 mVpp, 1.0 mVrms +/-12 V ¡ 10 mVpp, ¡2 mVrms Typ: 8.0 mVpp, 1.5 mVrms
Interface	RS 232, USB (2.0), CAN bus, Ethernet
Temperature sensors	Power Supply Control: nr. 1 FAN Unit: nr. 1 Backplane: nr. 8 (optional)
Over Voltage	Trip Off when the output voltage
Protection	> 103% ÷ 120% (programmable) of set voltage
Under Voltage	Trip Off when the output voltage
Protection	< 80% ÷ 97% (programmable) of set voltage
Over Current Protection	Trip Off when the current > programmable Iset value
Over Temperature Protection	Trip Off when temperature of a single Power Supply block > 90 ℃ Signaled: - temperature FAN Unit > 50 ℃ - temperature Power Supply Control > 65 ℃
Operation	0 ÷ 50 ℃ without derating,
Cooling Airflow:	540 m^2 /h (at maximum fan speed)
Firmware	VME8100 firmware can be upgraded via Ethernet

表 A.9: VME8100 の仕様 [26]

Packaging	19inch-wide, 8U-high Euro-mechanics rack; Depth: 720 mm.
Weight	Mainframe (*): 24 kg Mod. A1532: 3.2 kg
Power requirements	Voltage range: 100/230 V Frequency: 50/60 Hz Power: 3400 W
Max. number of boards per crate	16
Max. number of power supply units per crate	3
Primary power supply output (Mod. A 1531)	± 12 V, 8 A +5 V, 20 A
Power supply unit output (Mod. A 1532)	+48 V, 15.6 A
Max. output power	2250 W
Operating temperature	From 0 ℃ (dry atmosphere) to +40 ℃
Storage temperature	From -20 ℃ (dry atmosphere) to +50 ℃

表 A.10: SY1527LC の仕様 [27]

Polarity	A1535SN: Negative
Output Voltage	0 ÷ 3.5 kV
Max. Output Current	3 mA
Voltage Set/Monitor Resolution	500 mV
Current Set/Monitor Resolution	500 nA
VMAX hardware	0 ÷ 3.5 kV common for all the board channels
VMAX hardware accuracy	± 2% of FSR
VMAX software	0 ÷ 3.5 kV settable for each channel
VMAX software resolution	1 V
Ramp Up/Down	1 ÷ 500 Volt/sec, 1 Volt/sec step
Voltage Ripple	< 20 mV typical; max 30mV
Voltage Monitor vs. Output Voltage Accuracy	typical: ± 0.3% ± 0.5 V max: ± 0.3% ± 2 V
Voltage Set vs. Voltage Monitor Accuracy	typical: ± 0.3% ± 0.5 V max: ± 0.3% ± 2 V
Current Monitor vs. Output Current Accuracy	typical: ± 2% ± 1 μA max: ± 2% ± 5 μA
Current Set vs. Current Monitor Accuracy	typical: ± 3% ± 1 μA max: ± 3% ± 5 μA
Maximum output power	8 W per channel (software safety limit)
Power consumption	310 W @ full power

表 A.11: A1535SN の仕様 [28]

チャンネル数	16
インピーダンス	110 Ω（取り外し可能）
入力信号	ディファレンシャル ECL ロジック
パルス幅	10ns 以上
コネクタ	34PIN　ヘッダー
＊コインシデンス出力	
チャンネル数	16（A と B の各チャンネルの論理積）
入力信号	ディファレンシャル ECL ロジック
パルス幅	5〜200ns（トリムにて全チャンネル共通に調整）
コインシデンス幅	10ns 以下
コネクタ	34PIN　ヘッダー
＊ファイン出力	レモ型 (00.250)
Σ 1-8	2（NIM 信号）
Σ 9-16	2（NIM 信号）
Σ 1-16	2（NIM 信号）
＊ Multi 出力	1（-4mA/1Coincidence;50 Ωターミネーション）
＊ SUM 入力	1（カスケード入力用；50 Ωターミネーション）
＊電源	+6V=0.3A,-6V=2.3A,+12V=5mA,-12V=25mA
＊筐体	標準 NIM 規格 1 幅モジュール

表 A.12: N-RS 413 の仕様 [29]

＊チャンネル数	2(または、1)
＊入力インピーダンス	50 Ω
＊入力信号	NIM 信号
＊最小入力信号幅	5ns
＊最大入力周波数	100MHz(5ns 時)
＊ VETO 入力	1(NIM 信号)
＊出力数	20(または 40)
＊出力信号	NIM 信号 (ペア出力 -32mA)
＊電源	+6V=50mA,-6V=1.13A
＊筐体	標準 NIM 規格 1 幅モジュール

表 A.13: N-TM 605 の仕様 [30]

電気特性	インピーダンス	50 Ω
	周波数範囲	DC...300 M Hz
	絶縁抵抗	$\geq 10^6$M Ω
機械特性	脱着回数	≥500

表 A.14: SUHNER 製 SHV コネクタの仕様 [31]

		50 Ωコネクタ	75 Ωコネクタ
電気特性	インピーダンス	50 Ω	75 Ω
	周波数範囲	DC...4GHz	DC...1GHz
	絶縁抵抗	$5 \cdot 10^3$ MΩ	$5 \cdot 10^3$ MΩ
機械特性	脱着回数	≥500	≥500

表 A.15: SUHNER 製 BNC コネクタの仕様 [32]

Construction			
	Material	Detail	Diameter
Centre conductor	Copper, Tin plated	Strand-19	0.9 mm
Dielectric	PE (Polyethylene)		2.95 mm
Outer conductor	Copper, Tin plated	Braid, 96 %	3.6 mm
Jacket	PVC (Polyvinyl Chloride)	RAL 9005 - bk	4.95 mm +/- 0.15
Print	HUBER+SUHNER RG 58 C/U 50 Ohm (PA no.)		
Electrical Data			
Impedance	50 A +/- 2		
Max. operating frequency	1 GHz		
Capacitance	100.7 pF/m		
Velocity of signal propagation	66%		
Signal delay	5.03 ns/m		
Insulation resistance	$\geq 1 \times 10^8$ MΩm		
Min. screening effectiveness	> 38 dB (up to 1 GHz)		
Max. operating voltage	2.5 kVrms (at sea level)		
Test voltage	5 kVrms (50 Hz/1 min)		
Mechanical Data			
Weight	3.7 kg/100 m		
Min. bending radius	static		25 mm
	repeated (for max. 50 bendings)		50 mm
Environmental Data			
Temperature range	-40 ℃ + 85 ℃		
Installation temperature	-20 ℃ + 60 ℃		

表 A.16: RG_58_C/U の仕様 [33]

Construction			
	Material	Detail	Diameter
Centre conductor	Steel, Copper plated	Wire	0.58 mm
Dielectric	PE (Polyethylene)		3.64 mm
Outer conductor	Copper, Tin plated	Braid, 93 %	4.5 mm
Jacket	PVC II (non migration)	RAL 9005 - bk	6.1 mm +/- 0.15
Print	HUBER+SUHNER RG 59 B/U 75 Ohm (PA no.)		
Electrical Data			
Impedance	75 +/- 1.5		
Max. operating frequency	3 GHz		
Capacitance	67.6 pF/m		
Velocity of signal propagation	66%		
Signal delay	5.07 ns/m		
Insulation resistance	$\geq 1 \times 10^8$ MΩm		
Min. screening effectiveness	> 40 dB (up to 3 GHz)		
Max. operating voltage	3 kVrms (at sea level)		
Test voltage	6 kVrms (50 Hz/1 min)		
Mechanical Data			
Weight	5 kg/100 m		
Min. bending radius	static		35 mm
	repeated (for max. 50 bendings)		60 mm
Environmental Data			
Temperature range	-40 ℃... + 85 ℃		
Installation temperature	-20 ℃... + 60 ℃		

表 A.17: RG_59_B/U の仕様 [34]

Construction			
	Material	Detail	Diameter
Centre conductor	Steel, Copper plated	Strand-07	0.48 mm
Dielectric	PE (Polyethylene)		1.48 mm
Outer conductor	Copper, Tin plated	Braid, 87 %	2 mm
Jacket	PVC (Polyvinyl Chloride)	RAL 9005 - bk	2.55 mm +/- 0.1
Print	HUBER+SUHNER RG 174 U 50 Ohm (PA no.)		
Electrical Data			
Impedance	50 Ω +/- 2		
Max. operating frequency	1 GHz		
Capacitance	100.7 pF/m		
Velocity of signal propagation	66%		
Signal delay	5.03 ns/m		
Insulation resistance	$\geq 1 \times 10^8$ MΩm		
Min. screening effectiveness	> 40 dB (up to 1 GHz)		
Max. operating voltage	1.5 kVrms (at sea level)		
Test voltage	3 kVrms (50 Hz/1 min)		
Mechanical Data			
Weight	1.12 kg/100 m		
Min. bending radius	static		15 mm
	repeated (for max. 50 bendings)		25 mm
Environmental Data			
Temperature range	-40 ℃... + 85 ℃		
Installation temperature	-20 ℃... + 60 ℃		

表 A.18: RG_174_/U の仕様 [35]

INPUT	ECL 差動信号　100 Ωインピーダンス
	最小信号入力幅　4 ns
OUTPUT	ECL 差動信号　100 Ωインピーダンス
DELAY TIME	200ns ± 10ns(200ns の場合)
STABILITY	100ppm ／℃
PACKAGING	VME6U
POWER SUPPLY	5V 1A

表 A.19: 16ch,500ns VME ECL DELAY PRV-90 の仕様 [36]

電源容量	AC100V(± 10 %)	
定格出力	± 6V	各 15A
	± 12V	各 4A
	± 24V	各 2A
電圧可変範囲	各出力微調整用	
負荷変動	± 6V	0.2% 以下
	± 12V	0.1% 以下
	± 24V	0.1% 以下
入力変動	各出力 20mV 以下	
リップル	各出力 3mV (p-p) 以下	
過電流保護	± 6V	18A
	± 12V	5A
	± 24V	2.5A
使用温度	0〜40 ℃（室内での使用を前提）	
温度上昇保護	ヒートシンク温度 70 ℃にて STATUS ON	
	ヒートシンク温度 80 ℃以上で電源入力遮断	
放熱機能	強制空冷	
外形寸法	482.6(W) × 221(H) × 589(D)	

表 A.20: RPN-005-153 の仕様 [37]

Logic Functions:	Logical AND, OR, Majority logic and Fan-in/Fan-out. All functions have leading edge inhibit for the updating outputs, and bin gate inhibiting for both updating and overlap outputs.
Continuous Repetition Rate:	Updating - Greater than 150 MHz throughput rate, typically 160 MHz, with output width set at minimum. Overlap - Greater than 300 MHz throughput rate, typically 325 MHz.
Double-Pulse Resolution:	Updating - Less than 6.5nSec, typically 6.2nSec with output width set at minimum. Overlap - Less than 3.3nSec, typically 3.1nSec.
Input to Ouput Delay:	Updating - Less than 8.5nSec. Overlap - Less than 5.0nSec.
Multiple Pulsing:	None; One and only one output pulse regardless of input pulse amplitude or duration.
Power Supply Requirements:	- 6 Volts @ 400 mA -12 Volts @ 165 mA -24 Volts @ 60 mA + 6 Volts 250 mA +12 Volts @ 0 mA +24 Volts @ 35 mA 115 VAC @ 60 mA Note: All currents are within NIM specification limits permitting a full powered bin to be operated without overloading.
Operating Temperature:	0 oC to 70 oC ambient.
Packaging:	Standard single width NIM module in accordance
	with TID-20893 and Section ND-524.
Quality Control:	Standard 36-hour, cycled burn-in with switched power cycles.

表 A.21: Quad Majority Logic Unit NIM MODEL 756 の仕様 [38]

SYSTEM BUS	VME bus A16
DATA INPUT	IN 1-8 Negative NIM50 Ωインピーダンス
FAST INPUT	FAST IN 1-2 Negative NIM 50 Ωインピーダンス
BUSY OUTPUT	BUSY1-3 Negative NIM 50 Ωインピーダンス BUSY 1 :FAST IN 1 に INTERRUPT SIG が入力されると出力し LED 表示 BUSY 2 :FAST IN 2 に lNTERRUPT SIG が入力されると出力し LED 表示 BUSY 3 :DATA IN 1-8 のいずれかに INPUT が入力されると出力し LED 表示
DATA OUTPUT	OUTPUT REGISTER 出力 1-8 Z Negative NIM 50 Ωインピーダンス
SETUP TIME	IN 1-8 SETUP 14.3nS FAST IN 1-2 SETUP 2.7nS
INTERRUPT THROUGH TIME	5.7nS
DATA OUT TIME	19.0nS
SIZE	VME 規格 233.4(W) × 160(D) ダブルユーロサイズ
POWER SUPPLY	+5V 1.9A

表 A.22: RPV-130 の仕様 [39]

A.2 ジオメトリ

A.2.1 中性子検出器の位置

架台左の柱の右側面から各中性子検出器の左端までの距離 (図 A.9) をメジャーで測定した結果を表 A.23 に示す。

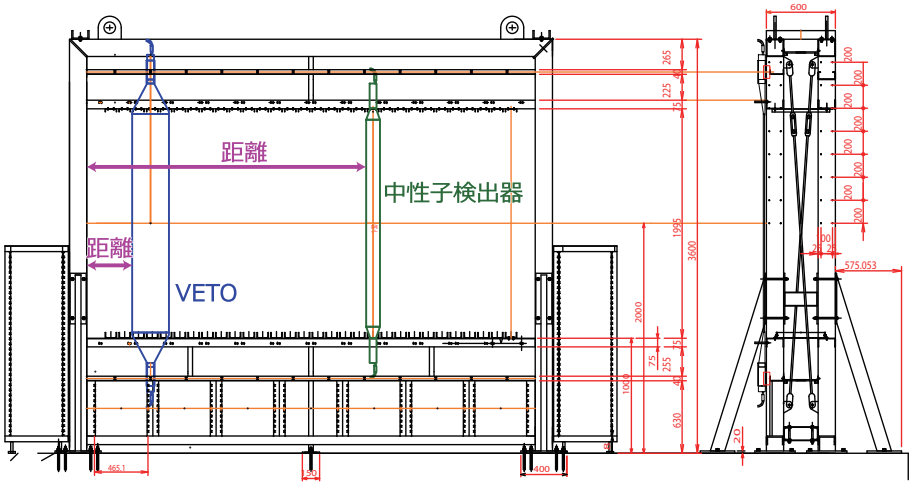


図 A.9: NEBULA の正面ならびに側面図：「距離」と表記した長さを測定した

ID	top [cm]	bottom [cm]	平均 [cm]
101	11.1	11.4	11.2
102	23.3	23.6	23.4
103	35.6	35.8	35.7
104	47.9	48.1	48.0
105	60.1	60.4	60.2
106	72.4	72.5	72.4
107	84.6	84.6	84.6
108	96.9	97.0	96.9
109	109.1	109.3	109.2
110	121.3	121.6	121.4
111	133.7	133.7	133.7
112	145.9	145.9	145.9
113	158.3	158.2	158.2
114	170.7	170.5	170.6
115	182.9	182.7	182.8

表 A.23: 中性子検出器の位置 :架台左の柱の右側面から各中性子検出器の左端までの距離を表す

ID	距離 [cm]
101-102	12.2
102-103	12.3
103-104	12.3
104-105	12.3
105-106	12.2
106-107	12.2
107-108	12.4
108-109	12.3
109-110	12.3
110-111	12.3
111-112	12.2
112-113	12.4
113-114	12.4
114-115	12.2

表 A.24: 各中性子検出器の左端同士の距離

A.2.2 中性子検出器のサイズ

中性子検出器のサイズをノギスで測定した結果を表 A.25 に示す。表中の wdith,depth の設定は図 A.10 に示す。

A.2.3 VETO の位置

架台左の柱の右側面から各 VETO の左端および右端までの距離をメジャーならびに定規で測定した結果を表 A.26 に、VETO と中性子検出器の間の距離を測定した結果を表 A.27 に示す。

A.3 光電子増倍管の ID 設定

セクション 6.1.3 で行った実験の結果の詳細を報告する。

今回、光電子増倍管合計 346 本（2 スタック分の中性子検出器＋ VETO+ 予備 10 本）のうち、94 本の試験を行った。さらに同研究室田中氏の行った 84 本 [40]、河田氏 ·Matta 氏の行った 84 本、同じく河田氏の行った 84 本の結果をそれぞれ表 A.28, A.29,A.30, A.31 に示す。それぞれの段階でゲインの高い順 (＝パルスハイト [波高] の高い順) にソートし、光電子増倍管の ID 設定を行った。その結果も表に示す。

図 A.11 には NEBULA の 1 スタック目に設置された/される予定の中性子検出器部および VETO 検出器部の光電子増倍管の ID を示す。図 3.8 に示したケーブルの ID とは開発上の都合により ID 設定が一致しない。

ID	width[mm]				depth[mm]			
	top	middle	bottom	平均	top	middle	bottom	平均
101	120.3	120.9	120.5	120.6	116.5	117.7	117.2	117.1
102	120.7	120.6	120.6	120.6	118.2	118.2	117.6	118.0
103	120.5	120.7	120.7	120.6	118.4	119.7	118.7	118.9
104	120.6	120.7	120.7	120.7	118.0	118.2	117.7	118.0
105	120.6	120.6	120.6	120.6	118.3	118.8	118.0	118.4
106	120.7	120.5	120.5	120.6	117.0	116.8	116.8	116.9
107	118.6	119.2	118.6	118.8	120.2	120.3	120.2	120.2
108	120.7	120.7	120.7	120.7	118.7	118.7	118.5	118.6
109	120.7	120.7	120.8	120.7	116.7	117.2	116.5	116.8
110	120.5	120.6	120.5	120.5	121.0	121.0	121.0	121.0
111	120.9	120.7	120.6	120.7	118.8	118.3	117.8	118.3
112	118.3	118.0	118.0	118.1	120.5	120.1	120.4	120.3
113	120.5	120.5	120.5	120.5	119.0	118.8	118.8	118.9
114	120.5	120.6	120.5	120.5	118.0	117.1	117.0	117.4
115	120.5	120.4	120.8	120.6	118.1	117.7	117.8	117.9
116	120.9	121.3	121.5	121.2	120.9	121.1	121.1	121.0
117	120.5	120.7	120.5	120.6	117.7	117.7	117.3	117.6
118	120.5	120.7	120.8	120.7	119.9	118.4	118.8	119.0
119	120.5	120.7	120.7	120.6	118.5	119.1	118.3	118.6
120	120.6	120.5	120.5	120.5	119.1	118.8	118.1	118.7
121	120.5	120.5	120.6	120.5	118.0	117.7	118.2	118.0
122	120.8	120.4	120.7	120.6	118.8	118.6	118.5	118.6
123	118.6	119.2	118.6	118.8	120.4	120.4	120.4	120.4
124	120.7	120.8	121.2	120.9	118.0	118.2	119.1	118.4
125	120.5	120.6	120.5	120.5	117.8	118.6	117.7	118.0
126	120.7	120.6	120.5	120.6	117.2	118.3	117.0	117.5
127	120.7	120.7	120.7	120.7	118.6	119.1	119.3	119.0
128	118.4	118.0	118.3	118.2	120.4	120.9	120.5	120.6
129	120.5	120.8	120.8	120.7	117.9	118.6	117.9	118.1
130	120.7	120.9	120.6	120.7	120.7	120.1	119.4	120.1

表 A.25: 中性子検出器のサイズ：width は横幅、depth は奥行きを表す (図 A.10)

ID	side	up[cm]	down[cm]
101	left	8.2	8.2
	right	40.2	40.3
102	left	39.2	39.6
	right	71.7	71.7
103	left	70.4	70.3
	right	102.4	102.6
104	left	101.1	101.6
	right	133.2	133.5
105	left	132.2	132.3
	right	164.4	164.4
106	left	163.4	163.5
	right	195.6	195.9
107	left	194.3	194.5
	right	226.5	226.5
108	left	225.5	225.6
	right	257.2	257.3
109	left	256.2	256.2
	right	288.3	288.4
110	left	287.3	287.5
	right	319.2	319.3
111	left	318.2	318.2
	right	350	350.3

表 A.26: VETO の位置：架台左の柱の右側面から各 VETO 左端までの距離 (図 A.9) を表す

VETO ID	中性子検出器 ID	距離 [cm]
101	101	22
101	106	34.8
106	115	19.5
106	130	32.3
107	115	21
107	130	34

表 A.27: VETO と中性子検出器の間の距離

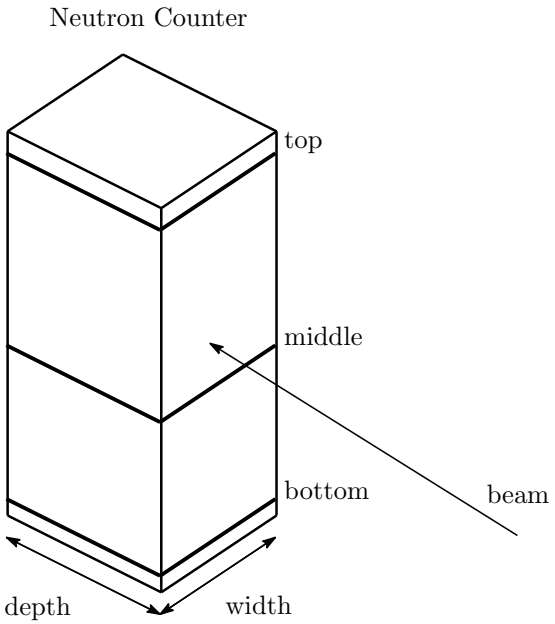


図 A.10: width,depth の設定

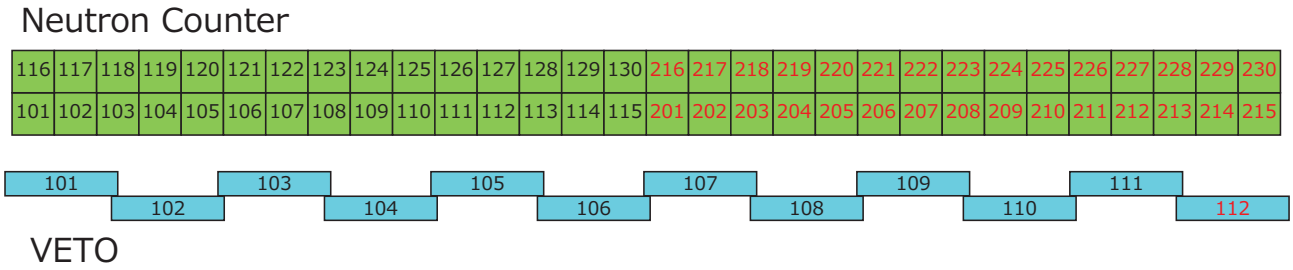


図 A.11: NEBULA の光電子増倍管 ID : 数字は ID、黒字は既に設置済み、赤字はこれから設置予定であることを示す。

A.4 HV channel 設定

電源ユニット SY1527LC 上での HV channel 設定[*3]を表 A.32, A.33 に示す。ここで、channel name は SY1527LC のディスプレイ上に表示される ID であり、それぞれ中性子検出器ならびに VETO の ID に対応する。ch#は SY1527LC に挿入されるボード A1535SN[*4]の端子に対応する。ch#を「$xx.yyyy$」と表現するとき、「xx」は SY1527LC のスロットに対応し、背面から見たとき左よりスロット 00〜15 である。A1535SN は 1 つにつき 2 スロット消費するので、SY1527LC の一番左に挿入した A1535SN が「00」、2 番目が「02」と偶数番のみ存在することになる。さらに「$.yyyy$」はそれぞれの A1535SN の端子に対応し、12×2 行列で端子を表現するとき、$(1,1)$ が「.0000」、$(1,2)$ が「.0001」、

[*3] user : admin でログインすることにより設定を変更することができる。

[*4] A1535SN から電源を供給する際にはインターロックの解除が必要である。インターロックを解除するためには次のいずれかの方法をとる。(1)PASSIVE INTERLOCK コネクタを 50Ω でターミネートする。(2)SIGNAL INTERLOCK コネクタに +5 V (3-4mA) の差分信号を供給する。以上、いずれかの方法でインターロックを解除しない限り電源は供給されないので注意が必要である。

ID	シリアル ナンバー	波高 [mV]	ID	シリアル ナンバー	波高 [mV]	ID	シリアル ナンバー	波高 [mV]	ID	シリアル ナンバー	波高 [mV]
VU101	3412	312	VD101	2764	310	VU301	4491	348	VU401	4530	352
VU102	3359	296	VD102	2509	294	VU302	4396	332	VU402	4554	322
VU103	3925	286	VD103	3999	284	VU303	4468	328	VU403	4131	318
VU104	2513	284	VD104	2767	278	VU304	4378	320	VU404	4334	308
VU105	4030	272	VD105	3986	272	VU305	4154	296	VU405	4332	296
VU106	3277	262	VD106	3624	249	VU306	4409	264	VU406	4305	292
VU107	2466	232	VD107	4045	222	VU307	4505	264	VU407	4559	268
VU108	2212	221	VD108	2255	218	VU308	4516	260	VU408	4463	230
VU109	4018	216	VD109	4024	214	VU309	4161	244	VU409	4433	226
VU110	3593	212	VD110	3677	209	VU310	4342	212	VU410	4306	222
VU111	4007	179	VD111	3681	171	VU311	4449	184	VU411	4310	194
VU112	3311	156	VD112	2470	142	VU312	4499	168	VU412	4308	192
VU201	4162	324	VD201	4223	324	VD301	4489	344	VD401	3949	348
VU202	4217	316	VD202	2524	308	VD302	4357	332	VD402	4508	320
VU203	2598	304	VD203	2458	300	VD303	4394	320	VD403	4042	312
VU204	4011	300	VD204	2280	300	VD304	4509	300	VD404	4041	302
VU205	4287	288	VD205	2505	288	VD305	4355	276	VD405	4473	294
VU206	4222	288	VD206	4289	264	VD306	4155	264	VD406	4267	286
VU207	2762	256	VD207	3479	248	VD307	4183	264	VD407	3778	248
VU208	2541	248	VD208	4285	244	VD308	4389	244	VD408	4566	230
VU209	4153	244	VD209	2274	240	VD309	4460	230	VD409	4297	224
VU210	4165	236	VD210	4549	232	VD310	4340	192	VD410	4431	210
VU211	3563	228	VD211	4194	224	VD311	4387	168	VD411	4026	192
VU212	2506	224	VD212	4547	212				VD412	4338	144

表 A.28: ゲインのテスト結果：VETO 検出器部。100 番台は田中氏が [40]、300 番台は河田氏 ·Matta 氏が、400 番台は河田氏が行った。

(2, 1) が「.0003」…となる（A1535SN のパネルに印字された番号そのものである)。したがって、例えば「06.0012」は SY1527LC を背面から見て左から 4 番目の A1535SN の左の列、上から 7 番目の端子を指す。

ID	シリアル ナンバー	波高 [mV]	ID	シリアル ナンバー	波高 [mV]	ID	シリアル ナンバー	波高 [mV]	ID	シリアル ナンバー	波高 [mV]
U101	3683	768	D101	3953	640	U201	4213	720	D201	4124	680
U102	3923	620	D102	3954	604	U202	4226	604	D202	4234	572
U103	3966	596	D103	3995	544	U203	4170	568	D203	3910	564
U104	3993	528	D104	3970	522	U204	3335	564	D204	4210	560
U105	3951	520	D105	3948	514	U205	4021	560	D205	4099	560
U106	3251	510	D106	2217	508	U206	3943	548	D206	4211	544
U107	3959	492	D107	3929	480	U207	2252	544	D207	4019	524
U108	3817	474	D108	4012	474	U208	4025	520	D208	3832	508
U109	3675	470	D109	3961	468	U209	4014	500	D209	3703	500
U110	2608	454	D110	2715	450	U210	3221	496	D210	4044	484
U111	3992	442	D111	3952	440	U211	3869	468	D211	4098	468
U112	2770	432	D112	3998	432	U212	2869	460	D212	4093	460
U113	3903	430	D113	2729	428	U213	4146	456	D213	3772	456
U114	3380	422	D114	3916	412	U214	4001	452	D214	4163	448
U115	3676	410	D115	3411	404	U215	2229	444	D215	4551	424
U116	3643	404	D116	2616	400	U216	4206	424	D216	2290	420
U117	3917	398	D117	3927	396	U217	2847	420	D217	4274	416
U118	3360	392	D118	3983	382	U218	4205	412	D218	4008	408
U119	3955	378	D119	2594	372	U219	4032	404	D219	2326	396
U120	2600	362	D120	3235	362	U220	4553	388	D220	4214	388
U121	4145	362	D121	2546	358	U221	3357	388	D221	4002	376
U122	3413	356	D122	3609	352	U222	2463	376	D222	4208	372
U123	3627	352	D123	3495	350	U223	4003	368	D223	4132	364
U124	2521	348	D124	3629	346	U224	4136	364	D224	4207	364
U125	3758	342	D125	2542	342	U225	2465	364	D225	3577	364
U126	3732	340	D126	3259	338	U226	4147	356	D226	4279	352
U127	4149	336	D127	2471	330	U227	4545	348	D227	2523	348
U128	3944	328	D128	3980	322	U228	4023	340	D228	4227	336
U129	3361	322	D129	2769	316	U229	4043	332	D229	4102	332
U130	4040	314	D130	4027	312	U230	2508	328	D230	3336	324

表 A.29: ゲインのテスト結果：中性子検出器部 1 スタック目。100 番台は田中氏が行った。[40]

ID	シリアル ナンバー	波高 [mV]	ID	シリアル ナンバー	波高 [mV]	ID	シリアル ナンバー	波高 [mV]	ID	シリアル ナンバー	波高 [mV]
U301	4139	1096	D301	4399	892	U401	4435	1060	D401	4376	896
U302	4458	880	D302	4356	856	U402	4380	856	D402	4374	812
U303	3859	852	D303	4410	832	U403	4313	788	D403	4430	676
U304	4348	792	D304	4238	780	U404	4440	674	D404	4565	668
U305	4253	772	D305	4092	770	U405	4580	662	D405	4444	648
U306	4415	756	D306	4418	752	U406	4360	646	D406	3931	642
U307	4454	748	D307	4358	744	U407	4364	610	D407	4134	600
U308	4426	744	D308	4169	696	U408	4327	596	D408	4103	576
U309	4411	688	D309	4412	684	U409	4472	562	D409	4271	560
U310	4456	676	D310	4263	672	U410	4561	552	D410	4280	550
U311	4493	664	D311	4453	664	U411	4537	550	D411	4122	542
U312	3889	660	D312	4405	650	U412	4006	540	D412	4074	528
U313	4471	592	D313	4501	582	U413	4382	522	D413	4555	520
U314	4521	568	D314	4425	564	U414	3199	516	D414	4079	516
U315	4343	564	D315	4352	564	U415	4538	516	D415	4254	514
U316	4406	552	D316	4344	544	U416	4323	506	D416	4071	494
U317	4354	544	D317	4480	524	U417	4312	494	D417	4485	494
U318	4395	524	D318	4427	508	U418	4372	486	D418	4462	486
U319	4469	500	D319	4464	488	U419	2272	478	D419	4020	464
U320	4496	480	D320	4467	476	U420	4562	460	D420	4486	458
U321	3868	468	D321	4466	468	U421	4519	450	D421	4432	448
U322	4494	456	D322	4515	456	U422	2998	446	D422	2763	444
U323	4034	452	D323	4512	452	U423	4465	442	D423	4362	440
U324	4479	440	D324	4492	432	U424	4365	432	D424	2624	430
U325	4514	420	D325	4371	412	U425	4221	424	D425	4369	414
U326	4475	408	D326	4497	392	U426	4532	408	D426	4299	388
U327	4422	392	D327	4438	384	U427	4461	380	D427	4339	374
U328	4504	384	D328	4414	380	U428	4560	372	D428	4292	372
U329	4345	376	D329	4489	360	U429	4379	368	D429	4581	366
U330	4488	360	D330	4150	356	U430	4366	362	D430	4077	352

表 A.30: ゲインのテスト結果： 中性子検出器部 2 スタック目。300 番台は河田氏 ·Matta 氏が、400 番台は河田氏が行った。

ID	シリアル ナンバー	波高 [mV]
0001	2503	208
0002	3567	208
0003	4010	208
0004	4182	192
0005	4152	188
0006	2472	184
0007	4189	176
0008	4225	176
0009	3965	148
0010	4191	144
-	4490	破損

表 A.31: ゲインのテスト結果：上記 10 本は予備とする。4490 は破損していた。

channel name	ch#	channel name	ch#	channel name	ch#	channel name	ch#
NEUT-101-U	00.0000	NEUT-101-D	02.0006	NEUT-201-U	04.0012	NEUT-201-D	06.0018
NEUT-102-U	00.0001	NEUT-102-D	02.0007	NEUT-202-U	04.0013	NEUT-202-D	06.0019
NEUT-103-U	00.0002	NEUT-103-D	02.0008	NEUT-203-U	04.0014	NEUT-203-D	06.0020
NEUT-104-U	00.0003	NEUT-104-D	02.0009	NEUT-204-U	04.0015	NEUT-204-D	06.0021
NEUT-105-U	00.0004	NEUT-105-D	02.0010	NEUT-205-U	04.0016	NEUT-205-D	06.0022
NEUT-106-U	00.0005	NEUT-106-D	02.0011	NEUT-206-U	04.0017	NEUT-206-D	06.0023
NEUT-107-U	00.0006	NEUT-107-D	02.0012	NEUT-207-U	04.0018	NEUT-207-D	08.0000
NEUT-108-U	00.0007	NEUT-108-D	02.0013	NEUT-208-U	04.0019	NEUT-208-D	08.0001
NEUT-109-U	00.0008	NEUT-109-D	02.0014	NEUT-209-U	04.0020	NEUT-209-D	08.0002
NEUT-110-U	00.0009	NEUT-110-D	02.0015	NEUT-210-U	04.0021	NEUT-210-D	08.0003
NEUT-111-U	00.0010	NEUT-111-D	02.0016	NEUT-211-U	04.0022	NEUT-211-D	08.0004
NEUT-112-U	00.0011	NEUT-112-D	02.0017	NEUT-212-U	04.0023	NEUT-212-D	08.0005
NEUT-113-U	00.0012	NEUT-113-D	02.0018	NEUT-213-U	06.0000	NEUT-213-D	08.0006
NEUT-114-U	00.0013	NEUT-114-D	02.0019	NEUT-214-U	06.0001	NEUT-214-D	08.0007
NEUT-115-U	00.0014	NEUT-115-D	02.0020	NEUT-215-U	06.0002	NEUT-215-D	08.0008
NEUT-116-U	00.0015	NEUT-116-D	02.0021	NEUT-216-U	06.0003	NEUT-216-D	08.0009
NEUT-117-U	00.0016	NEUT-117-D	02.0022	NEUT-217-U	06.0004	NEUT-217-D	08.0010
NEUT-118-U	00.0017	NEUT-118-D	02.0023	NEUT-218-U	06.0005	NEUT-218-D	08.0011
NEUT-119-U	00.0018	NEUT-119-D	04.0000	NEUT-219-U	06.0006	NEUT-219-D	08.0012
NEUT-120-U	00.0019	NEUT-120-D	04.0001	NEUT-220-U	06.0007	NEUT-220-D	08.0013
NEUT-121-U	00.0020	NEUT-121-D	04.0002	NEUT-221-U	06.0008	NEUT-221-D	08.0014
NEUT-122-U	00.0021	NEUT-122-D	04.0003	NEUT-222-U	06.0009	NEUT-222-D	08.0015
NEUT-123-U	00.0022	NEUT-123-D	04.0004	NEUT-223-U	06.0010	NEUT-223-D	08.0016
NEUT-124-U	00.0023	NEUT-124-D	04.0005	NEUT-224-U	06.0011	NEUT-224-D	08.0017
NEUT-125-U	02.0000	NEUT-125-D	04.0006	NEUT-225-U	06.0012	NEUT-225-D	08.0018
NEUT-126-U	02.0001	NEUT-126-D	04.0007	NEUT-226-U	06.0013	NEUT-226-D	08.0019
NEUT-127-U	02.0002	NEUT-127-D	04.0008	NEUT-227-U	06.0014	NEUT-227-D	08.0020
NEUT-128-U	02.0003	NEUT-128-D	04.0009	NEUT-228-U	06.0015	NEUT-228-D	08.0021
NEUT-129-U	02.0004	NEUT-129-D	04.0010	NEUT-229-U	06.0016	NEUT-229-D	08.0022
NEUT-130-U	02.0005	NEUT-130-D	04.0011	NEUT-230-U	06.0017	NEUT-230-D	08.0023

表 A.32: SY1527LC 上での HV channel 設定 NEUT

channel name	ch#
VETO-101-U	10.0000
VETO-102-U	10.0001
VETO-103-U	10.0002
VETO-104-U	10.0003
VETO-105-U	10.0004
VETO-106-U	10.0005
VETO-107-U	10.0006
VETO-108-U	10.0007
VETO-109-U	10.0008
VETO-110-U	10.0009
VETO-111-U	10.0010
VETO-112-U	10.0011
VETO-101-D	10.0012
VETO-102-D	10.0013
VETO-103-D	10.0014
VETO-104-D	10.0015
VETO-105-D	10.0016
VETO-106-D	10.0017
VETO-107-D	10.0018
VETO-108-D	10.0019
VETO-109-D	10.0020
VETO-110-D	10.0021
VETO-111-D	10.0022
VETO-112-D	10.0023

表 A.33: SY1527LC 上での HV channel 設定 VETO

A.5 架台への保持方法

中性子検出器ならびに VETO 検出器部の架台への保持方法について詳述する。ただし、以下に述べる保持方法はすべて 1 台目のスタックについてのものであり、2 台目以降は幾つか仕様が変更される。

A.5.1 中性子検出器

上部

中性子検出器部上部のライトガイドの「首」の部分にゴムシート (図 A.13) を巻き、前後 2 つのモジュールを 1 セットとして中性子検出器部上部固定具 (図 A.14) で固定し、L アングルにより架台上部の梁に固定する (図 A.15、図 A.16)。

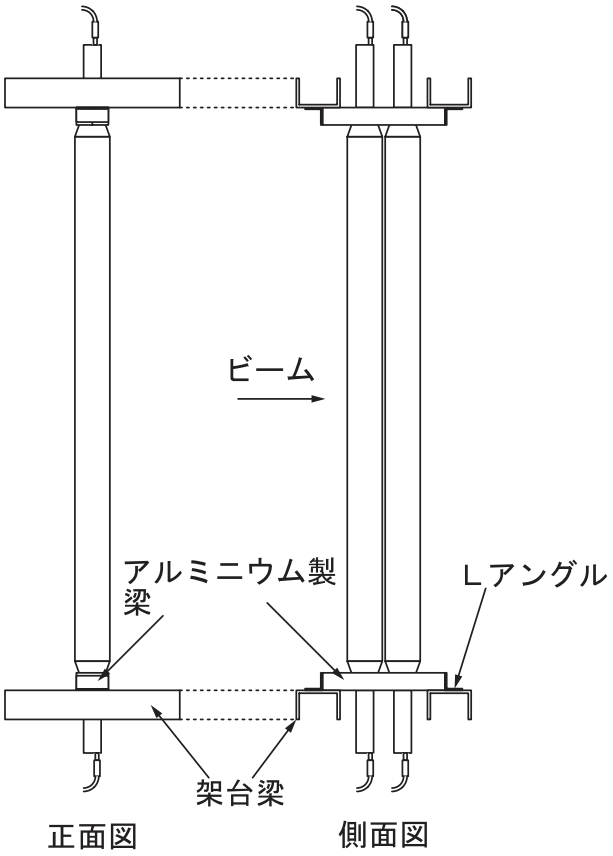


図 A.12: 中性子検出器部の架台への保持方法 [17]

下部

下部ライトガイドをデルリンの部品を介してアルミ製の梁 (穴の開いた箱型の金具)(図 A.19) に通してライトガイドにより自重を支える。前後 2 つのモジュールで一組として架台間に渡し、L アングルによりこれを架台へと固定している。

光電子増倍管を覆う軟鉄磁気シールド下部にはアルミのスポーク (図 A.17) を介して光電子増倍管固定用のリング (絶縁テープを巻くことにより絶縁を図っている)(図 A.20) を固定することにより光電子増倍管部分を支えている。こ

図 A.13: 長さ 16.5cm 程度のゴムシート：中性子検出器部上部のライトガイドの「首」の部分に巻く

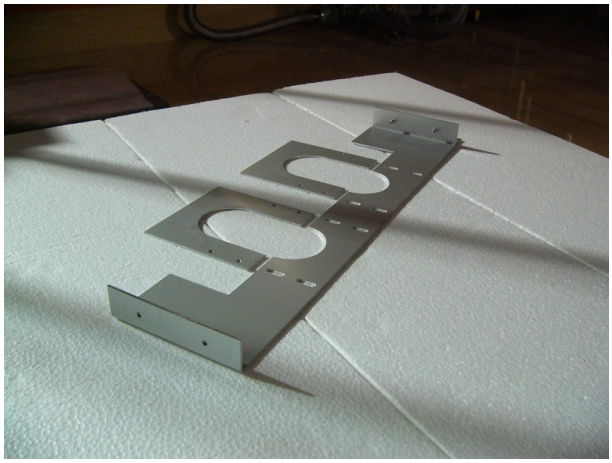


図 A.14: 中性子検出器部上部固定具 (アルミ製)

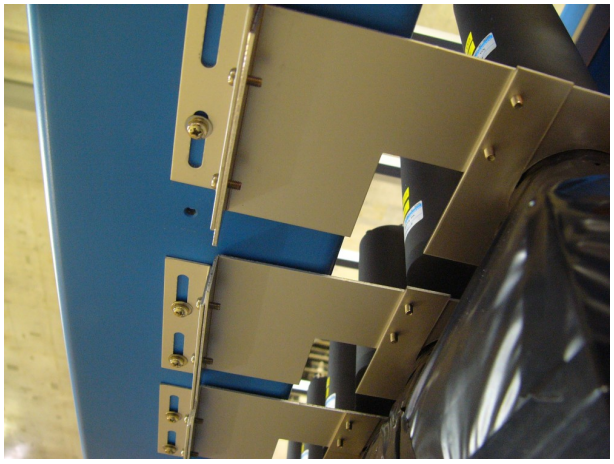


図 A.15: 中性子検出器部上部固定具と架台上部の梁を L アングルにより固定する

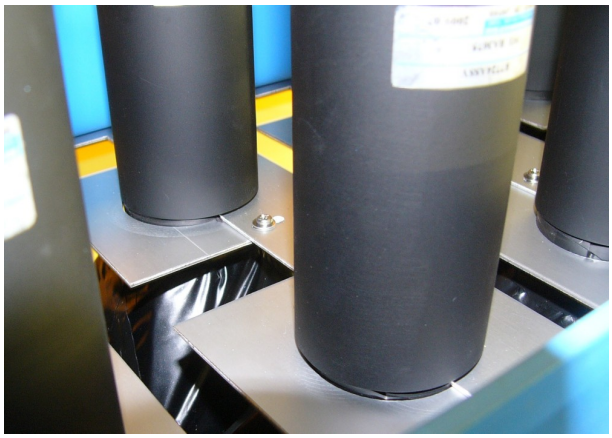


図 A.16: 中性子検出器部上部ライトガイドにゴムシートを巻き固定具で固定する

れは中性子検出器下部の光電子増倍管がその自重により接着がはがれ脱落することを防ぐのが目的である[*5]。

[*5] 2009 年 7 月に RARF の RIPS を用いて行われた r405n 実験 [20] の際には、準備の段階で中性子検出器の光電子増倍管が脱落していることが発覚し、その補修作業を行わざるを得なかった。RIPS の中性子検出器と比べると NEBULA はモジュールの着脱が容易にはできない構造になっているので、NEBULA における補修作業には相当の手間を要することが予測される。

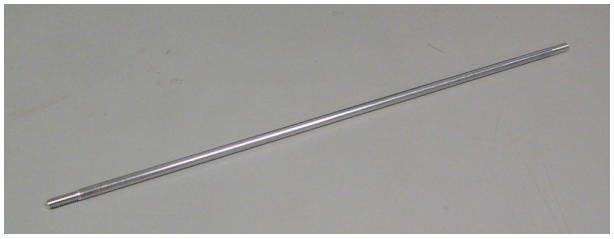


図 A.17: アルミのスポーク：光電子増倍管を支えるために用いる

図 A.18: アルミ製の梁を L アングルにより架台下部の梁と固定している

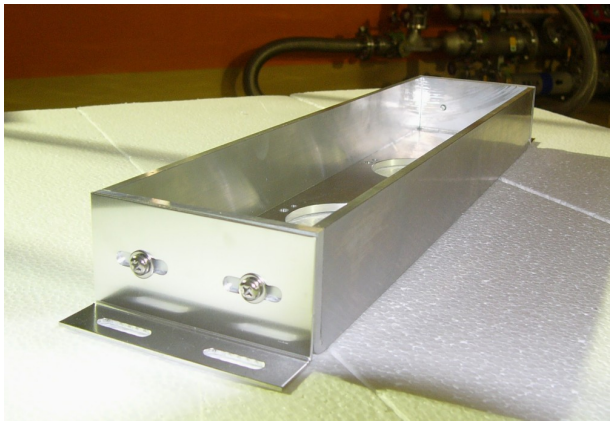


図 A.19: アルミ製の梁：デルリンの部品を介して中性子検出器部を支える

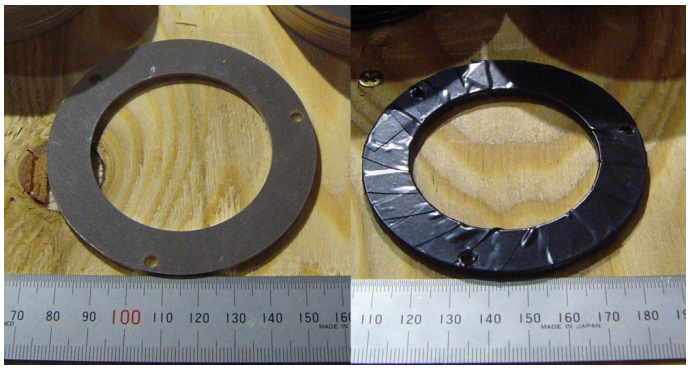


図 A.20: 左：光電子増倍管固定用リング　右：絶縁のためテープを巻いた状態

A.5.2 VETO 検出器部

下部

架台下部の梁に円筒棒 (ライトガイド支え)(図 A.23) を固定する。奥側の VETO の場合は架台側よりアルミのプレート (図 A.24)、VETO のライトガイド部分、アルミのプレート、ナットの順でライトガイドを挟みこの円筒棒により重さを支える (図 A.25 左)。

手前側の VETO の場合は奥側の VETO に接触することを防ぐため、架台側より、スペーサー (図 A.22)、ワッシャー 2 枚、アルミのプレート、VETO のライトガイド部分、アルミのプレート、ナットの順でライトガイドを挟みこの円筒棒により重さを支える (図 A.25 右)。

この際、ライトガイドに触れるアルミのプレート内側ならびに円筒棒にはゴムシートを巻いて直接金属部が接触するのを防いでいる。

さらに架台下部エレクトニクス部上部の梁にコの字アングル (図 A.26,A.27) を介して軟鉄磁気シールドを固定し、この中に VETO 検出器部の光電子増倍管を収めている (図 A.28,A.29)。中性子検出器部と同様、アルミのスポークを

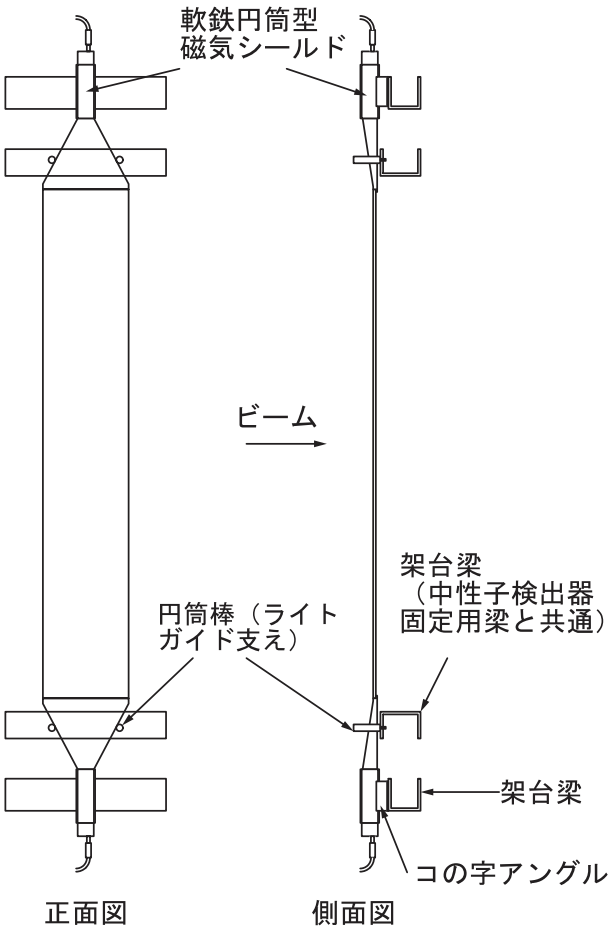


図 A.21: VETO 検出器部の架台への保持方法 [17]

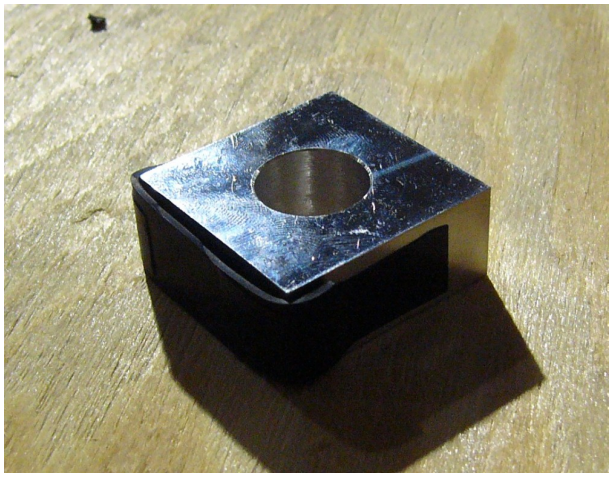


図 A.22: スペーサー： (1) 手前側の VETO が奥側の VETO と接触しないよう距離を保持する。(2) 上部ライドガイドと円筒棒の間の隙間を埋め安定性の向上を図る。以上の 2 つの目的で使用する。(2) の場合には写真のようにライドガイドと触れる面にゴムシートを巻き、金属部が直接ライドガイドに触れるのを防ぐ。

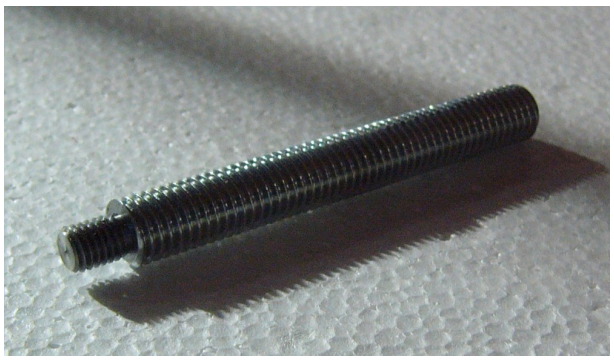


図 A.23: 円筒棒 (ライトガイド支え)：ライドガイドを支える部分にはゴムシートを巻いて使用する

図 A.24: VETO 検出器部固定用のアルミのプレート：ライトガイドへの直接の接触を防ぐためゴムシートを貼り付けている

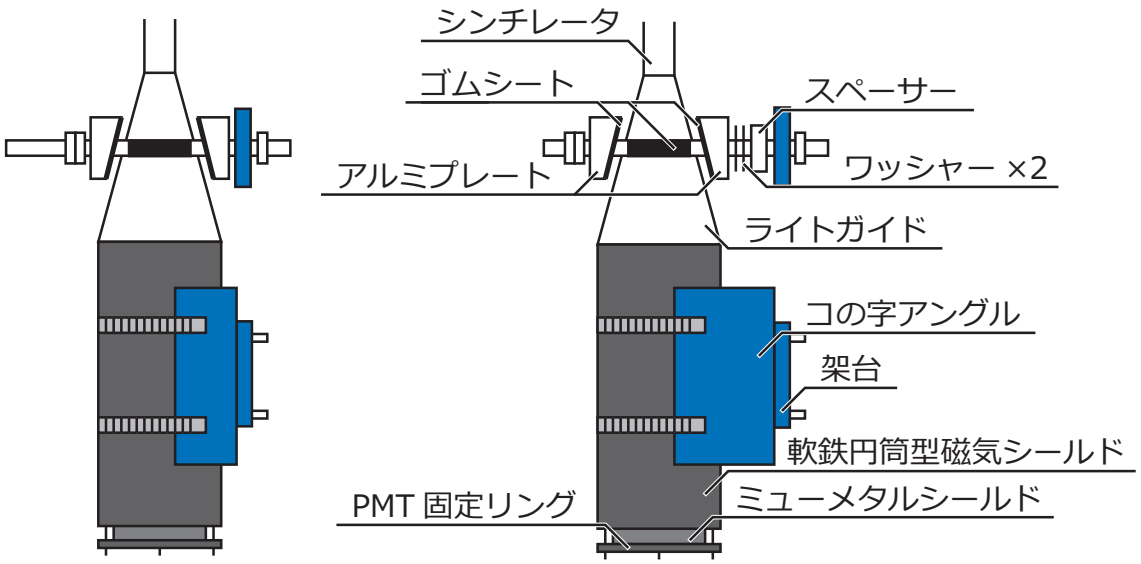


図 A.25: 左：奥側の VETO 検出器部下部の固定方法　右：手前側の VETO 検出器部下部の固定方法。上部もほぼ同様の構成である。

介して固定リングで光電子増倍管を支え、自重による脱落を防いでいる。

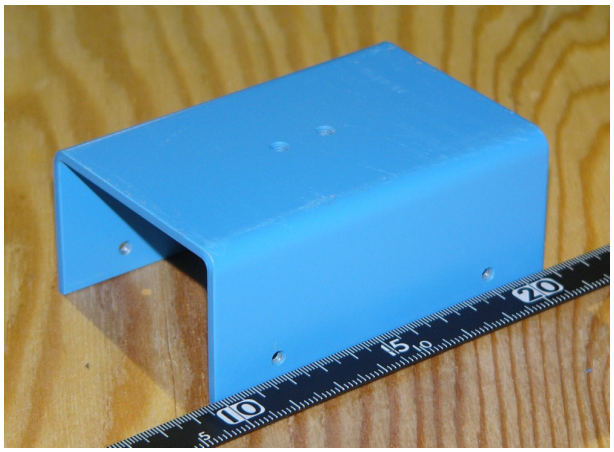


図 A.26: コの字アングル：VETO 検出器部下部の軟鉄磁気シールドの固定に用いる

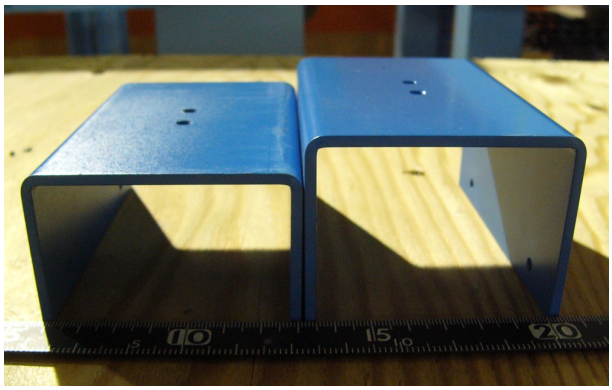


図 A.27: 左：奥側の VETO 用コの字アングル　右：手前側の VETO 用コの字アングル

上部

上部についても下部とほぼ同様の構成であるが、2 枚のアルミのプレート間にスペーサーを挟みライトガイドと円筒棒の間の隙間を埋める。これにより横方向へのぐらつきを抑える (図 A.31)。

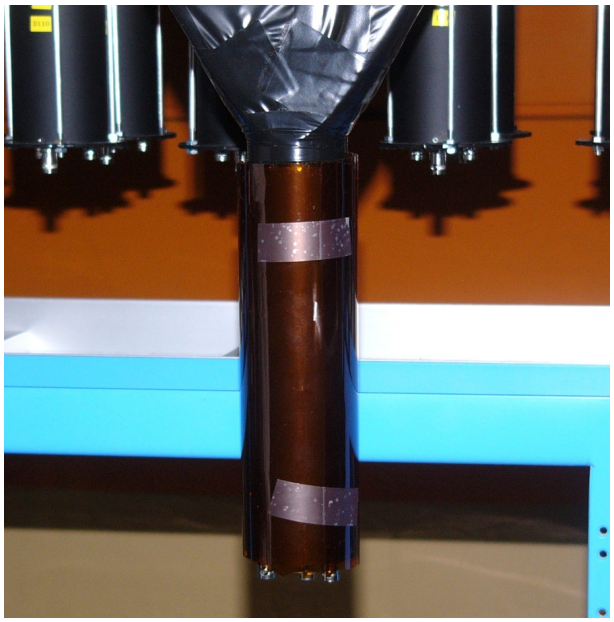


図 A.28: VETO 検出器下部： カプトン膜によりミューメタルシールドを覆う

図 A.29: VETO 検出器下部： コの字アングルで軟鉄円筒型磁気シールドを固定する

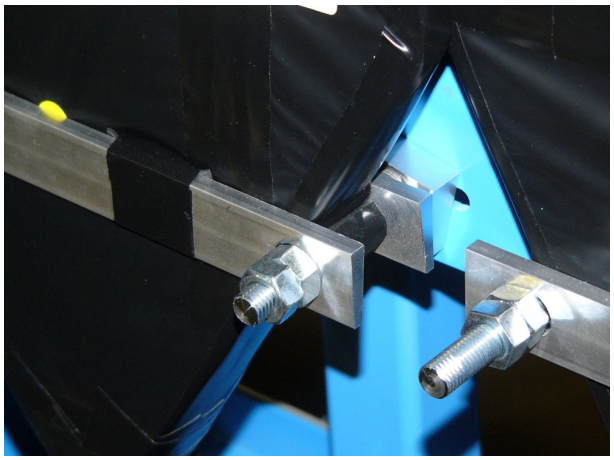


図 A.30: VETO 検出器下部： 円筒棒とアルミのプレートでライトガイドを固定する

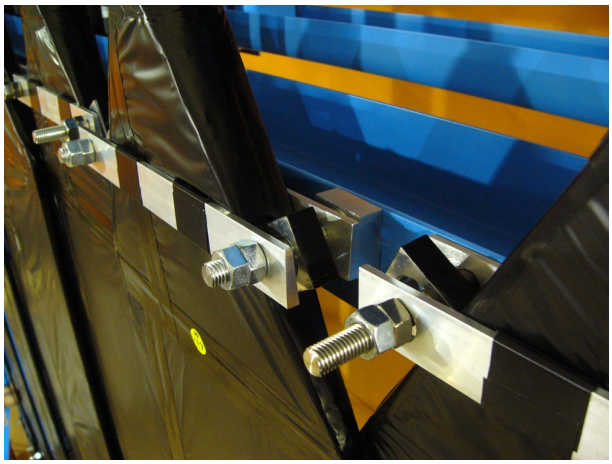


図 A.31: VETO 検出器上部： スペーサーにより横方向でのぐらつきを抑える

A.6 1 台目のスタックの問題点

現在開発中の 1 台目のスタックには開発の際に明らかとなった問題点がいくつか存在する。以下、それらを列挙する。2 台目以降ではこれらの点を改良する予定である。

A.6.1 架台

架台転倒防止部品を取り付ける穴

架台同士をつなぐ突っ張りと共通のねじになっている (図 A.32)。

■問題点■

転倒防止部品だけを取り外すことができない。

→架台本体側はタップにする。

図 A.32: 架台：架台転倒防止部品と突っ張りが共通のねじになっている

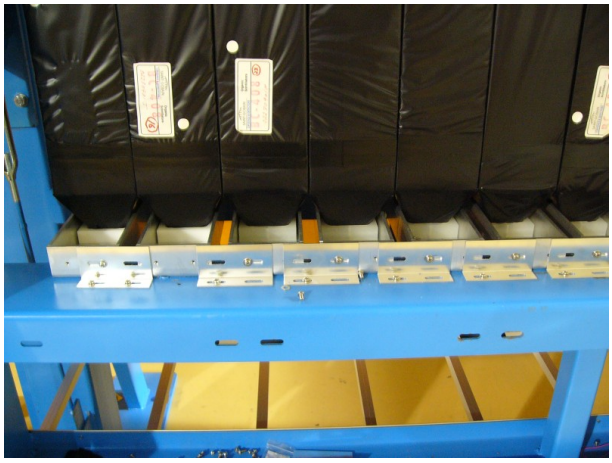


図 A.33: 架台と L アングル：中心部から設置していくと端では穴を使えない

中性子検出器の横方向の位置を決めているタップ穴

検出器が 12cm 間隔になるように開けてある。

■問題点■

端の検出器は穴を使えない (遮光シートの厚みが考慮されていない)(図 A.33)。

→ 12.3cm 間隔にする (参考：表 A.24)。

→ 1 台目のスタックについては中心よりモジュールの位置を合わせ、穴の位置が合わなくなる端においては専用の L アングルを製作し固定している。

ケーブルを這わすための梯子

架台上部のケーブルを這わすための梯子が取り外しのできない構造になっている。

■問題点■

中性子検出器の設置の際に邪魔となる。取り外せるとよい。

→あらかじめ穴をあけておき、取り外し可能にする。

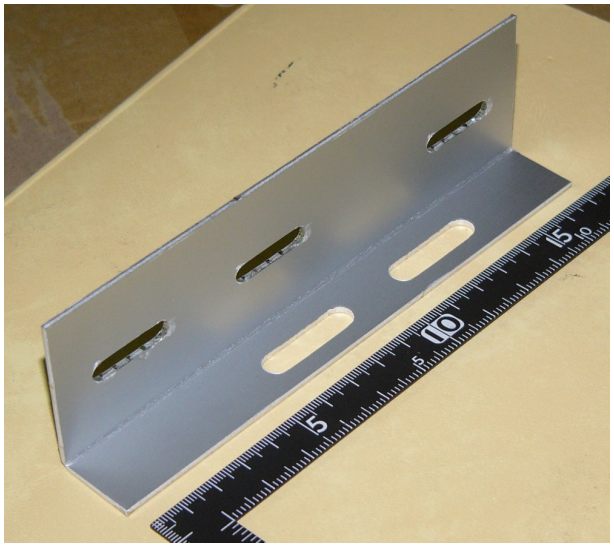


図 A.34: L アングル：1 台目のスタックの端のモジュールに用いる専用部品 (下部)

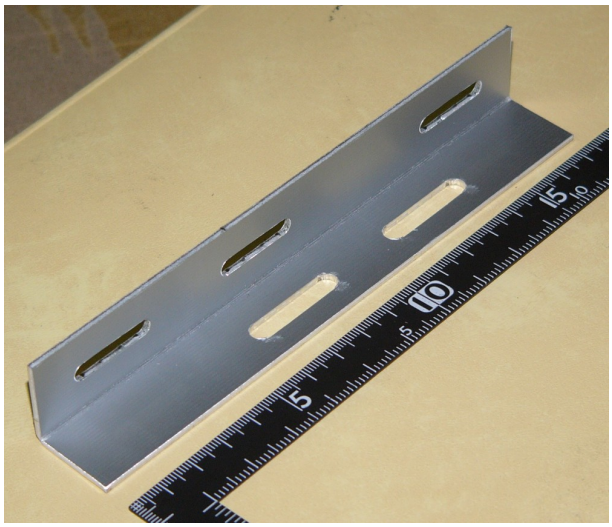


図 A.35: L アングル：1 台目のスタックの端のモジュールに用いる専用部品 (上部)

A.6.2　部品

中性子検出器下部 PMT 固定用の棒

■問題点■

長さに余裕がない (図 A.36)。

→さらに長くする

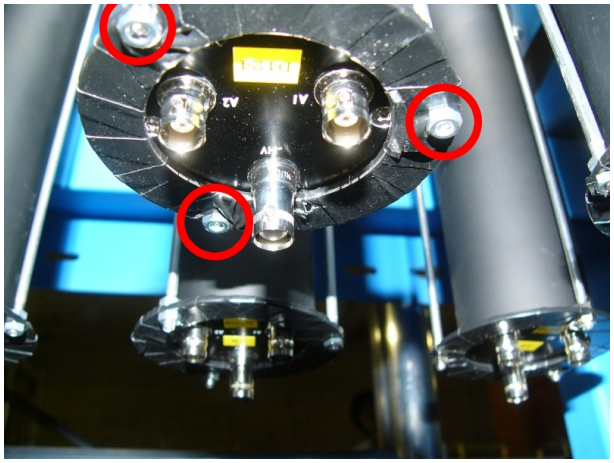


図 A.36: 中性子検出器下部 PMT 固定用の棒：長さに余裕がない

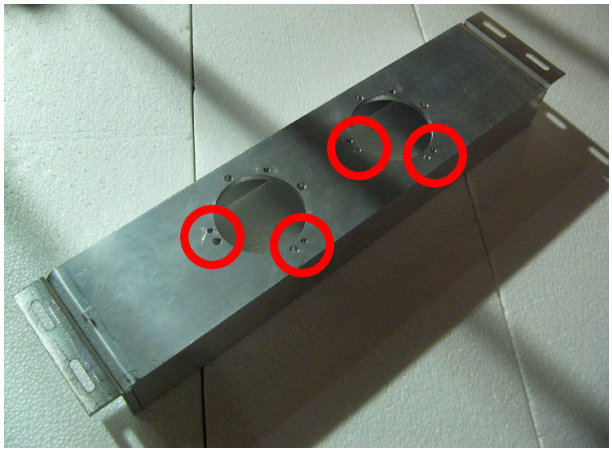


図 A.37: 中性子検出器下部固定具：穴同士が隣接している

中性子検出器下部固定具

デルリンの部品の固定用の穴と PMT 固定用の棒の穴とが隣接している箇所がある (図 A.37)。

■問題点■

隣接しているとナットを止めにくい。
→穴の位置をずらす

中性子検出器上部固定具

板が薄く軟らかい

■**問題点**■現状では軟らかすぎて作業しにくい
→厚みを増してより硬いものへと変更する。

Appendix.B　シミュレーション

この章ではシミュレーションの原理について詳述する。

B.1　宇宙線 Cosmic ray

図 B.1 に大気中での二次宇宙線の主要な構成要素を示す。大気上層近くの電子と陽子を除いて全ての二次宇宙線は一次宇宙線と大気中との相互作用により生ずる。ミューオンとニュートリノは電荷を帯びたメソンの崩壊から、電子と光子は中性メソンの崩壊からそれぞれ生ずる。

図 B.1 に見るように宇宙線として地表付近に到達するのはほとんどがミューオンである。そこで以降断りなく宇宙線と表現するとき、これはミューオンを指すものとする。さらにシミュレーションにおいてもミューオンのみを再現し、他の宇宙線については考慮に入れていない。

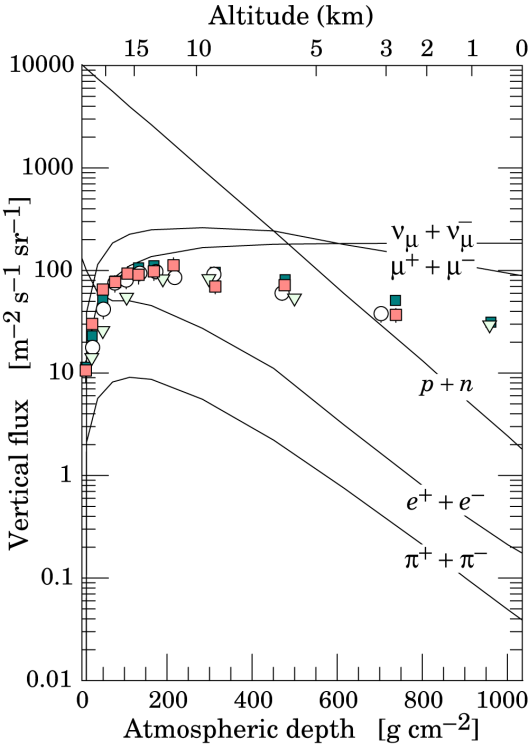


図 B.1: 1GeV 以上のエネルギーを持つ宇宙線の大気中での鉛直強度：実線は近似式による再現。点は $E_\mu > 1\text{GeV}$ の μ^- の測定値 [41]

B.2 ミューオンのエネルギー分布

地表でのミューオンのエネルギー分布は (B.2.1),(B.2.2),(B.2.3) で再現することができる [42]。

$$I(p_\mu, \theta) = I_V(\xi)\cos^3\theta \tag{B.2.1}$$

$$\xi = p_\mu \cos\theta \tag{B.2.2}$$

$$I_V(p_\mu) = c_1 p_\mu^{-(c_2 + c_3\log_{10}(p_\mu) + c_4\log_{10}^2(p_\mu) + c_5\log_{10}^3(p_\mu))} \tag{B.2.3}$$

ここでミューオンの運動量を p_μ[GeV] とし、(B.2.3) 中のパラメーターを表 B.1 に示す。

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
0.00253	0.2455	1.288	-0.2555	0.0209

表 B.1: ミューオンの近似式のパラメーター

この近似式を使って天頂角 $\theta = 0°$, $75°$ の時のミューオンの運動量分布をプロットしたものが図 B.2 である。さらに比較の為に図 B.3 にこれまでの観測値 [41] を示す。

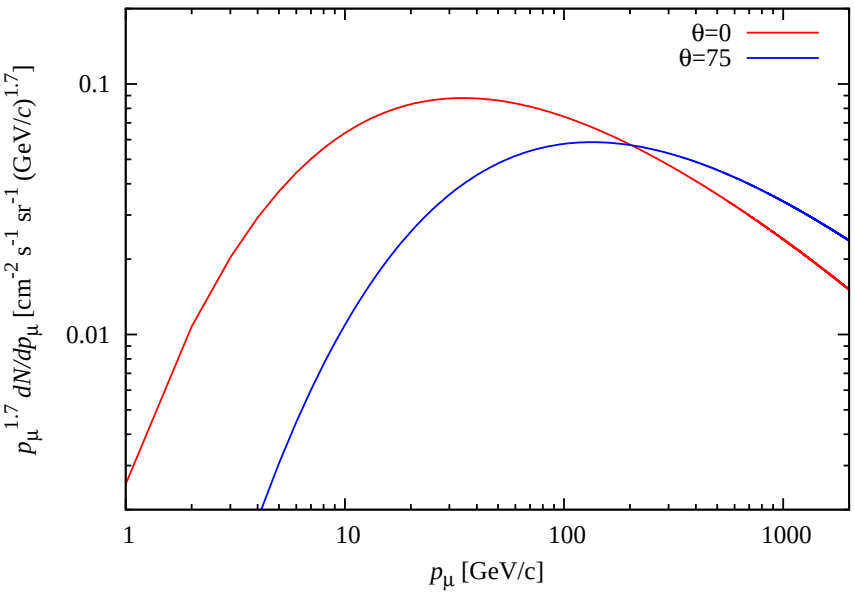


図 B.2: 近似式による地表でのミューオンの運動量分布の再現 赤:$\theta = 0°$ 青:$\theta = 75°$

この近似式を用いてエネルギーと天頂角の二変数に対するミューオンの強度を三次元でプロットしたものが図 B.2.3 である。

今回のシミュレーションではこの近似式を用いて地表でのミューオンのエネルギー分布を再現した。

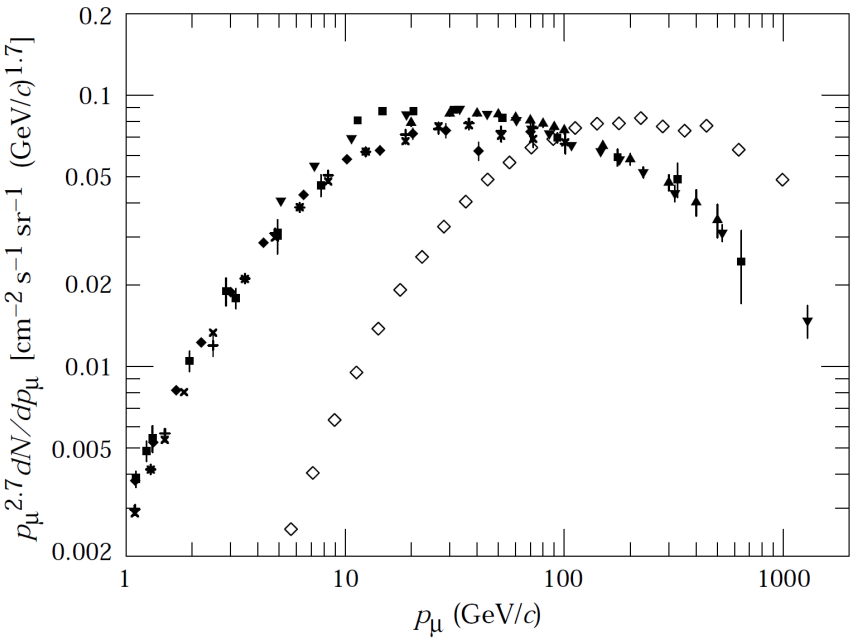


図 B.3: 地表でのミューオンのエネルギー分布の観測値 [41] 黒:$\theta = 0°$ 白:$\theta = 75°$

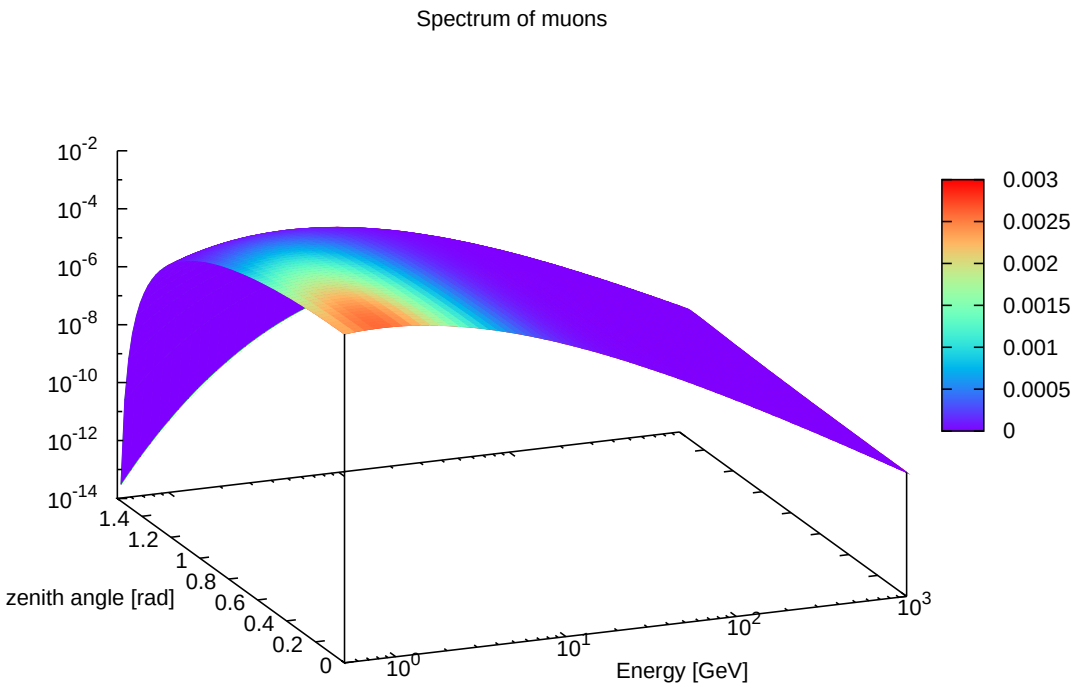


図 B.4: 地表でのミューオンの強度

B.3 乱数発生器 Random number generator

モンテカルロシミュレーションには乱数の生成が必要である。当初、乱数発生器として fortran 標準の `rand` を用いていたが、棄却法により宇宙線の分布を再現する時点で酷い周期性が現れることが発覚した。図 B.5 に `rand` による宇宙線のエネルギー分布を示す。`rand` の周期は 2147483648 であり、あまり長くないために擬似乱数列を使い切ってしまっている様子が分かる。そこで、乱数発生器としてメルセンヌ・ツイスタ Mersenne twister[43] を採用した。メルセンヌ・ツイスタによる宇宙線のエネルギー分布を図 B.6 に示す。メルセンヌ・ツイスタの周期は $2^{19937}-1$ と極めて長く、図 B.6 では周期性は見られない。また、実行スピードも格段に早くなった。

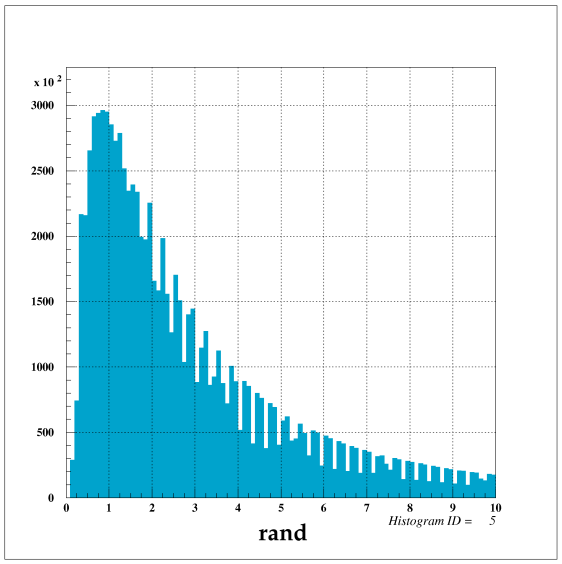


図 B.5: rand によるエネルギー分布の再現：周期性が確認できる

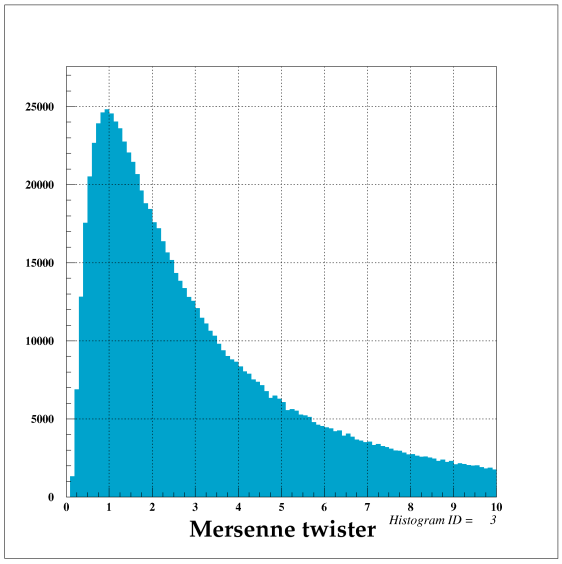


図 B.6: Mersenne twister によるエネルギー分布の再現：周期性は確認できない

B.4 エネルギー損失 Energy loss

B.4.1 Bethe-Bloch fomula

物質中での平均エネルギー損失 Mean energy loss は Bethe-Bloch の式 (B.4.1) により計算できる [44]。

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A}\frac{z^2}{\beta^2}\left[\ln\left(\frac{2m_e\gamma^2 v^2 W_{\max}}{I^2}\right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z}\right] \tag{B.4.1}$$

$$2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 = 0.1535\mathrm{MeVcm}^2/\mathrm{g} \tag{B.4.2}$$

r_e: 古典電子半径 ($= 2.817 \times 10^{-13}$cm)
m_e: 電子の質量
N_a: アボガドロ定数 ($= 6.022 \times 10^{23}\mathrm{mol}^{-1}$)
I: 物質の平均電離エネルギー
Z: 物質の原子番号

A: 物質の質量数
ρ: 物質の密度
z: 入射粒子の原子番号
m: 入射粒子の質量
E: 入射粒子のエネルギー
$\beta =$ 入射粒子の相対論的速度 $v/c = \sqrt{1 - m^2/E^2}$
$\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2} = E/m$
δ: イオン化におけるエネルギー損失の密度効果の補正

$$\delta = \begin{cases} 0 & (X < X_0) \\ 4.6052X + C_0 + a(X1 - X)^m & (X_0 < X < X_1) \\ 4.6052X + C_0 & (X > X1) \end{cases} \tag{B.4.3}$$

ここで、 $X=\log_{10}(\beta\gamma)$

I[eV]	$-C_0$	a	m	X_1	X_0
63.6	3.20	0.1610	3.24	2.49	0.1464

表 B.2: プラスチックの場合の密度効果補正のパラメーター

C: シェル補正

$$\begin{aligned} C = &(0.422377\eta^{-2} + 0.0304043\eta^{-4} - 0.00038106\eta^{-6}) \times 10^{-6} I^2 \\ &+(3.850190\eta^{-2} - 0.1667989\eta^{-4} + 0.00157955\eta^{-6}) \times 10^{-9} I^3 \end{aligned} \tag{B.4.4}$$

ここで、 $\eta = \beta\gamma$

$W_{\max}$: 1 回の衝突における最大エネルギー移行

$$W_{\max} = \frac{2m_e c^2 \eta^2}{1 + 2s\sqrt{1+\eta^2} + s^2} \tag{B.4.5}$$

ここで、 $s = m_e/m$

(B.4.1) を用いてプラスチック中でのミューオンの阻止能 (stopping power) をプロットしたものが図 B.7 である。図 B.7 にはさらに重イオンのエネルギー損失を計算するため実際に使われている既存のコード E_NEW の出力結果[*1]も併せて載せた。これら 2 つを比較すると 2 つのグラフの重なった領域 (MIP [*2]領域) では約 20[KeV/g cm^2] 程度の差が認められたが、1% 以下の差であり問題は無いと判断した。

B.4.2 Straggling prameter

エネルギー損失は (B.4.1) を使って計算できる。だが、実際には入射粒子と物質との衝突によりエネルギーを失うため、その値は衝突回数に依存する。よってエネルギー損失は確定的なものとはならず、確率的な揺らぎが存在する。そ

[*1] 途中で垂直に曲がっているのはこのコードが仕様上入射粒子のエネルギー 3000MeV 以下の範囲でしか使えないためである。さらに MIP 領域において値ががたついているのはコードの中でマトリックスを読み込んでいる部分が原因と考えられる。つまり、単なる関数を計算しているのではなく元々持っている有限の値を参照して出力を得ているために、ミューオンのような軽い粒子に対してはその分の寄与が大きく反映されるものと考えられる。

[*2] **M**inimum **I**onizing **P**articles : 最小電離損失粒子

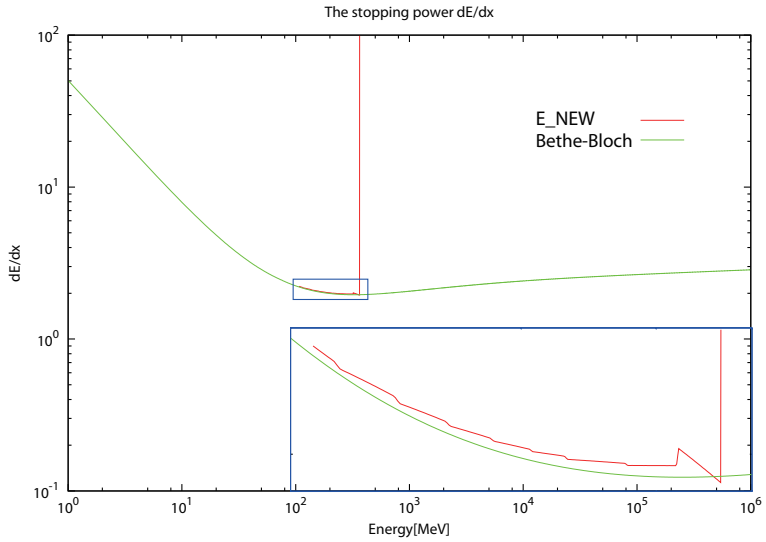


図 B.7: プラスチック中でのミューオンの阻止能：緑が (B.4.1) による出力結果、赤が E_NEW の出力結果である。2 つのグラフの重なった部分 (青) を右下に拡大して示した

の分布は入射粒子と物質に依存し、一般に図 B.8 のようになる。分布のピークを Most probable energy loss、平均値を Mean energy loss と呼ぶ。Mean energy loss が Bethe-Bloch の式で計算される値である。

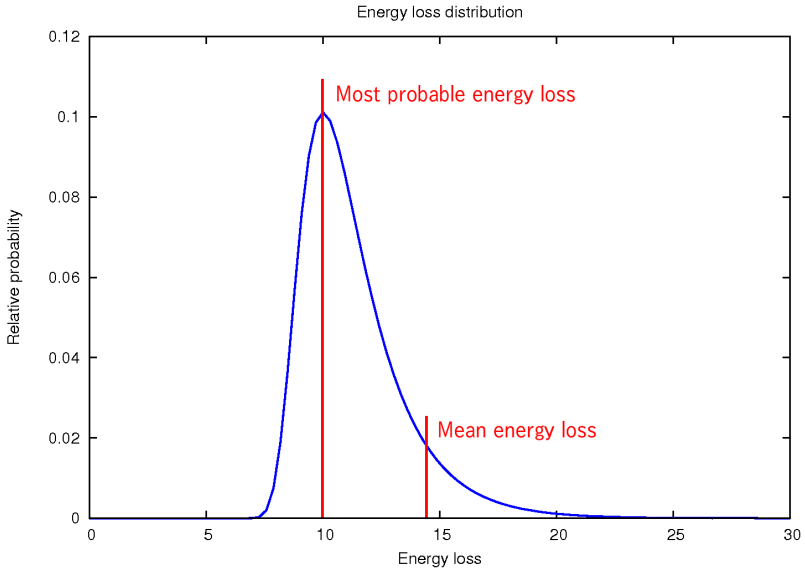


図 B.8: 物質中でのエネルギー損失の分布

Straggling prameter κ によりエネルギー損失の分布を場合分けすることができる。Straggling prameter κ を (B.4.6) により定義する。

$$\kappa = \frac{\Delta}{W_{\max}} \tag{B.4.6}$$

$W_{\max}$ は (B.4.5) により定義される、1 回の衝突あたりの最大のエネルギー移行である。Δ は物質中でのエネルギー損失である。すなわち、(B.4.1) 中の $\dfrac{dE}{dx}$ を用いて、物質の厚さを x としたとき、

$$\Delta = \int_0^x \frac{dE}{dx} dx \tag{B.4.7}$$

となる。

エネルギーが 1GeV(定数) のミューオンをプラスチックおよびコンクリートに入射させたときの κ を飛跡の長さの関数としてプロットしたものが図 B.9 である。

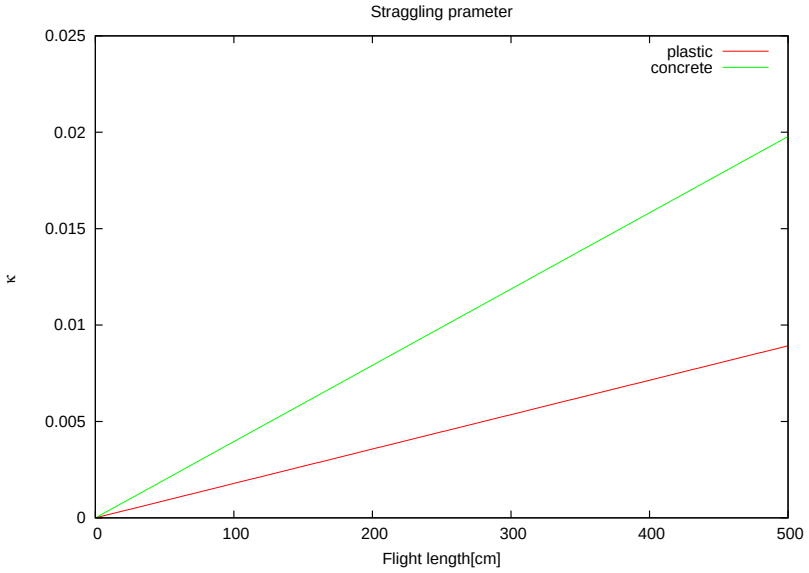


図 B.9: 飛跡の長さ [cm] vs κ (エネルギー:1GeV)

一方、飛跡の長さを 14cm(定数) としてミューオンをプラスチックおよびコンクリートに入射させたときの κ をエネルギーの関数としてプロットしたものが図 B.9 である。

B.4.3　Shulek 関数 Shulek function

Straggling prameter κ を用いて厚さ t の物質を通過するときの全エネルギー損失量 Δ は

$$f(t, \Delta, delta_2) = \frac{1}{\pi W_{\max}} e^{\kappa(1+\beta^2\Gamma)} \int_0^\infty \exp[\kappa f_1(y)] \cos[\lambda_1 y + \kappa f_2(y)] dy \tag{B.4.8}$$

で表現できる [45]。ここで、

$$f_1(y) = \beta^2[\ln y - \mathrm{Ci}(y)] - \cos(y) - y\mathrm{Si}(y) \tag{B.4.9}$$

$$f_2(y) = y[\ln y - \mathrm{Ci}(y)] + \sin(y) + \beta^2 \mathrm{Si}(y) \tag{B.4.10}$$

$$\lambda_1 = \kappa\lambda + \kappa \ln \kappa \tag{B.4.11}$$

Si(y):sin の積分関数

Ci(y):cos の積分関数

$$\lambda = \langle\lambda\rangle + \frac{\Delta - \langle\Delta\rangle}{\xi} \tag{B.4.12}$$

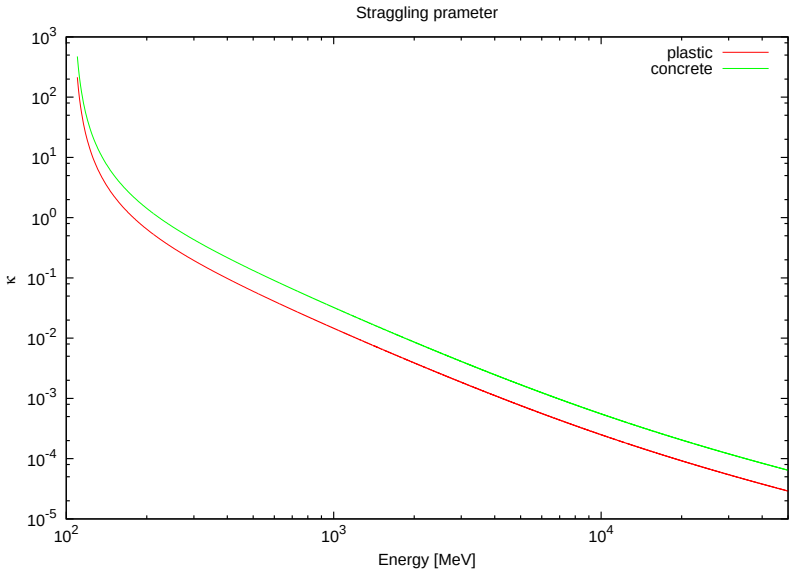


図 B.10: エネルギー vs κ (飛跡の長さ:14cm)

$$\langle\lambda\rangle = -(1-\gamma) - \beta^2 - \ln\kappa \tag{B.4.13}$$

$$\xi = 2\pi N_a \frac{e^4}{m_e c^2}\left(\frac{z}{\beta}\right)^2 \frac{Z}{A}\rho x \tag{B.4.14}$$

γ はオイラーの定数 ($\gamma = 0.57721\cdots$) [*3] である。

ここで、$\langle\Delta\rangle$ は Mean energy loss であり、Bethe-Bloch の式で計算できる。さらに λ はランダウ分布 (セクション B.4.4)、Vavilov 分布 (セクション B.4.5)、ガウス分布 (セクション B.4.6) のいずれかに従う。

B.4.4 ランダウ分布 Landau distribution

薄い物質中でのエネルギー損失の分布は Landau により初めて理論的に示された [46]。この理論により汎用のプラスの値へ長いテールを引く鋭いピークを特徴とする非対称確率密度関数が与えられる。これは個々の衝突回数が少ないことに起因する。衝突回数が少ないとき、エネルギーの絶対量に対し、エネルギーが移行する確率が小さくなるのである。

確率密度関数の定義は

$$\phi(\lambda) = \frac{1}{2i\pi}\int_{c-i\infty}^{c+i\infty} e^{s\log(s)+\lambda s} ds = \frac{1}{2i\pi}\int_{c-i\infty}^{c+i\infty} \exp(\lambda s + s\ln s) ds \tag{B.4.15}$$

である。

ここで、λ はエネルギー損失に比例する無次元量、c は正の実数である。さらにランダウ分布 $\Phi(\lambda)$ は

$$\Phi(\lambda) = \int_{\lambda}^{-\infty} \phi(\lambda) d\lambda \tag{B.4.16}$$

となる。

[*3] オイラーの定数 Euler's constant :

$$\gamma \equiv \lim_{n\to\infty}\left(\Sigma_{k=1}^{n}\frac{1}{k} - \ln(n)\right) = \int_1^{\infty}\left(\frac{1}{\lfloor x\rfloor} - \frac{1}{x}\right) dx$$

エネルギー損失分布は $\kappa < 0.01$ のときランダウ分布でよく記述できる。
シミュレーター中では Cern library を利用してランダウ分布にしたがう乱数を生成している[*4]。

B.4.5 Vavilov 分布 Vavilov distribution

さらに一般の κ に対するエネルギー損失の分布は Vavilov によって理論的に示された [47]。
Vavilov 密度関数は

$$\phi_V(\lambda;\kappa,\beta^2) = \frac{1}{2\pi i}\int_{c-i\infty}^{c+i\infty} e^{\lambda s} f(s;\kappa,\beta^2)ds \tag{B.4.17}$$

と定義される。ここで c は任意の実定数。さらに

$$f(s;\kappa,\beta^2) = C(\kappa,\beta^2)\exp\left\{s\ln\kappa + (s+\kappa\beta^2)\left[\ln\left(\frac{s}{\kappa}\right) + E_1 n\left(\frac{s}{\kappa}\right)\right] - \kappa\exp\left(-\frac{s}{\kappa}\right)\right\} \tag{B.4.18}$$

$$E_1(x) = \int_0^x t^{-1}(1-e^{-t})dt \tag{B.4.19}$$

$$C(\kappa,\beta^2) = \exp\{\kappa(1+\beta^2\gamma)\} \tag{B.4.20}$$

Vavilov 分布は次式で与えられる。

$$\Phi_V(\lambda;\kappa,\beta^2) = \int_{\lambda}^{-\infty} \phi_V(\lambda;\kappa,\beta^2)d\lambda \tag{B.4.21}$$

エネルギー損失の分布は一般に Vavilov 分布により再現される。Vavilov 分布は $\kappa \to 0$ でランダウ分布、$\kappa \to \infty$ でガウス分布に一致する。シミュレーター中では Cern library を利用して Vavilov 分布にしたがう乱数を生成している[*5]。

B.4.6 ガウス分布 Gaussian distribution

物質が十分に厚いとき、入射粒子の物質との衝突回数が多くなる。故に中心極限定理により Vavilov 分布は κ が大きいとき (=物質が厚いとき)、ガウス分布に近づく。
ガウス分布は次式で与えられる。

$$f(x,\Delta) \propto \exp\left(\frac{-(\Delta-\bar{\Delta})^2}{2\sigma^2}\right) \tag{B.4.22}$$

$$\sigma_0^2 = 4\pi N_a r_e^2 (m_e c^2)^2 \rho\frac{Z}{A}x = 0.1569\rho\frac{Z}{A}x \text{ [MeV]} \tag{B.4.23}$$

$$\sigma^2 = \frac{\left(1-\frac{1}{2}\beta^2\right)}{1-\beta^2}\beta^2\sigma_0^2 \tag{B.4.24}$$

図 B.11,B.11 にこれまで述べた分布の効果を取り入れたエネルギー損失分布を示す。いずれのヒストグラムにおいてもエネルギーも飛跡の長さ (FL) も定数としているが、エネルギー損失が特定の値をとらず特有の分布を示すことが分かる。

[*4] 詳細はセクション B.6.1 参照
[*5] 詳細はセクション B.6.2 参照

図 B.13 に NEBULA のシミュレーションを行った際の Straggling prameter κ の分布を示す (この κ 分布は中性子検出器にミューオンがヒットする度に κ を算出してプロットしたヒストグラムである。故にその総計は生成したミューオンの数を越えている)。この図から結局ほとんどの場合はランダウ分布 ($\kappa < 0.01$) に属することが分かる。一方でわずかながらも vavilov 分布 ($0.01 < \kappa$) の領域になるミューオンも存在し、スペクトルをフィットする際に単純にランダウ分布をフィットすることが厳密には正しい操作ではないと言える。

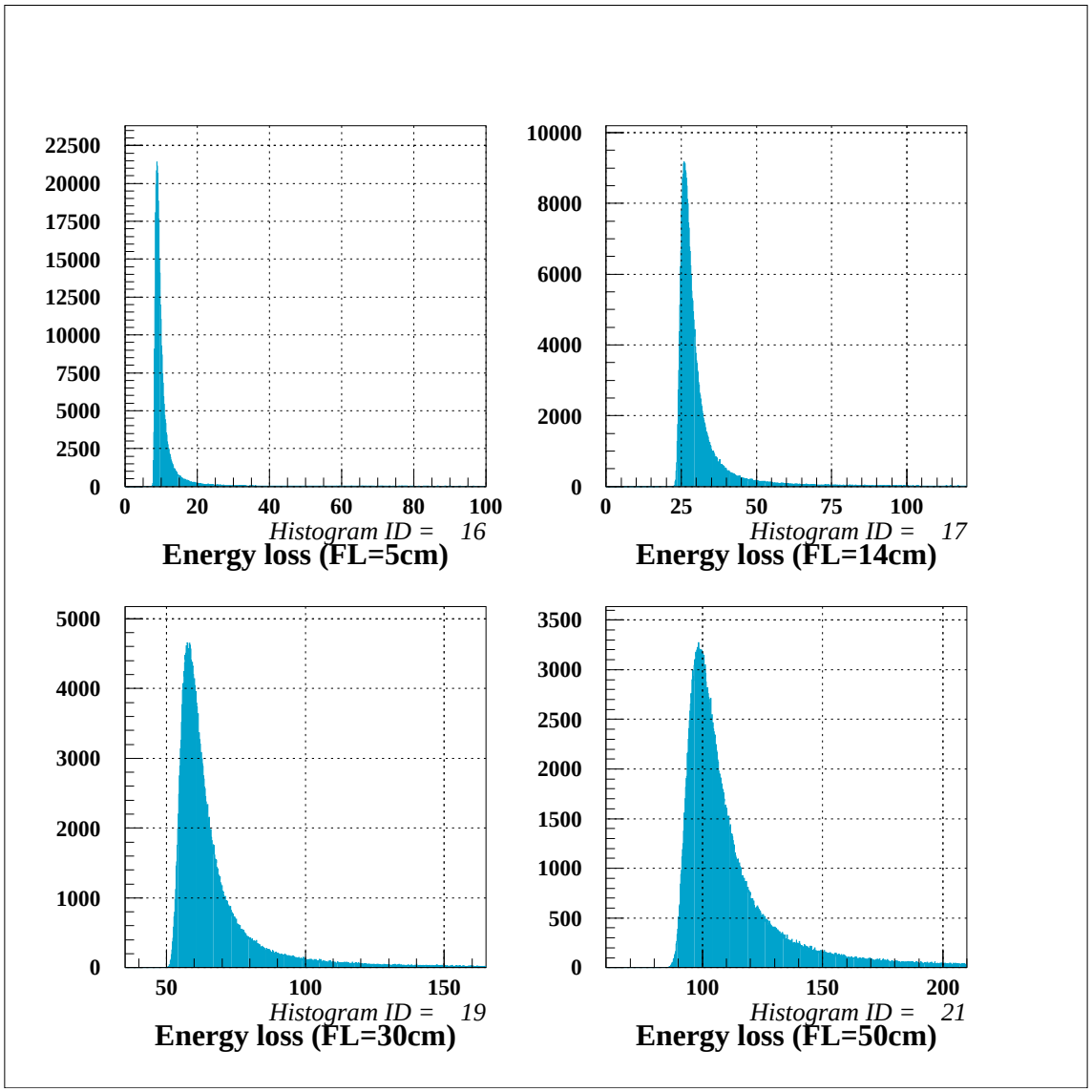


図 B.11: エネルギー損失分布 (エネルギー:1GeV) 横軸:エネルギー損失 [MeV] 縦軸:カウント

B.5　ランダウ分布の近似式

ランダウ分布には以下の近似式が存在する。図 B.8 は (B.5.1) を用いてプロットした。ただし、シミュレーターには使っていない。

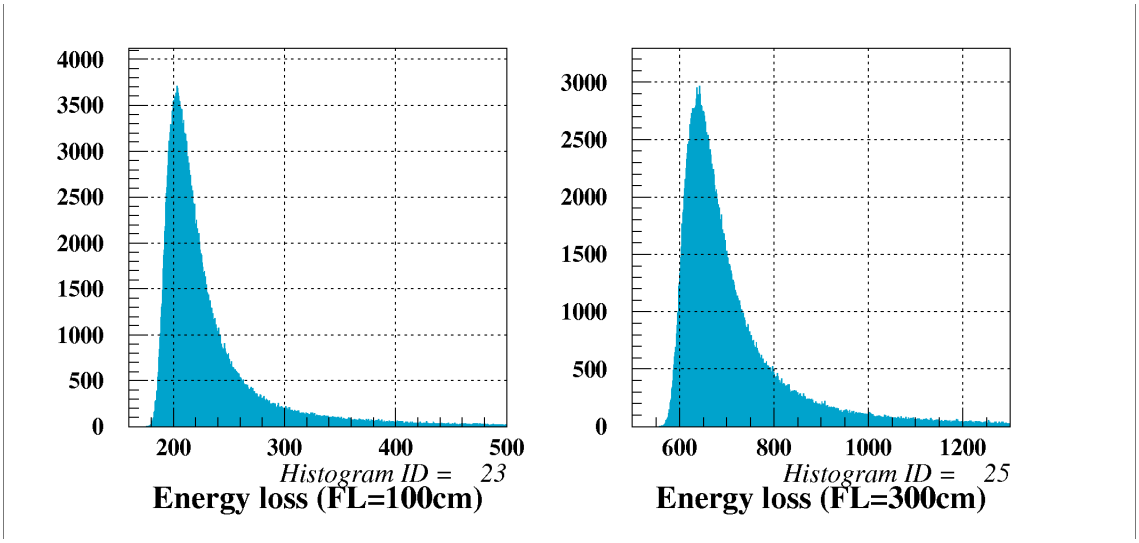


図 B.12: エネルギー損失分布 (エネルギー:1GeV) 横軸:エネルギー損失 [MeV] 縦軸:カウント

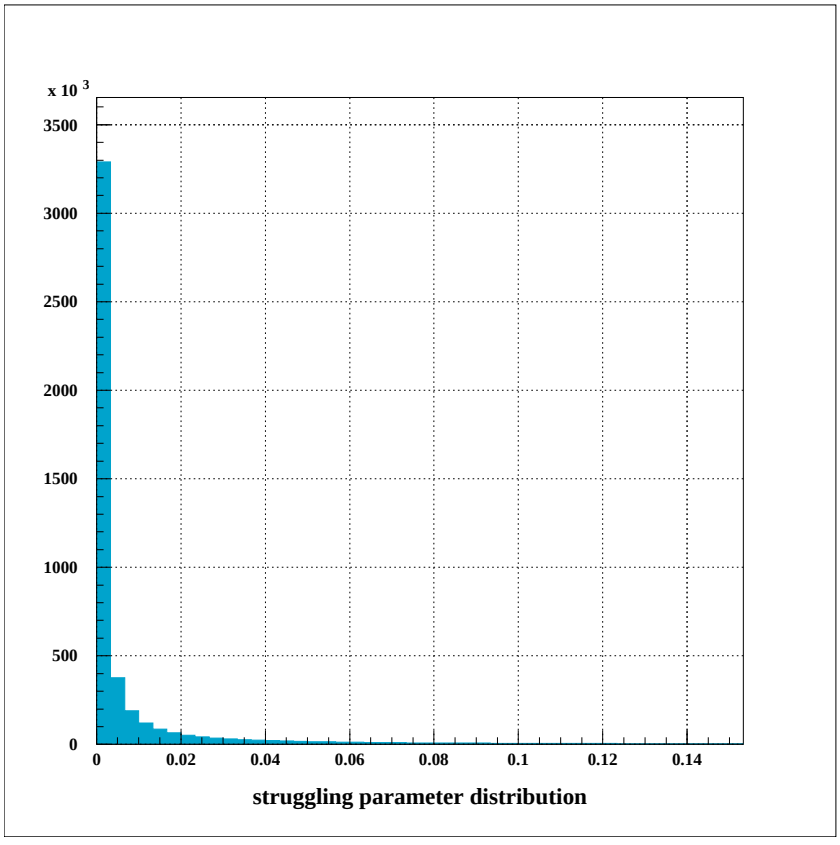


図 B.13: Straggling prameter κ 分布 横軸:Straggling prameter κ 縦軸:カウント

$$\Psi(\lambda) = \frac{\exp\{-(\lambda + e^{-\lambda})/2\}}{\sqrt{2\pi}} \tag{B.5.1}$$

ここで、
$\lambda = R(E - E_p)$
E_p : most probable energy loss
R : 物質に依存する定数

B.6 Cern library

B.6.1 ランダウ分布 G110

Cernlibrary にはランダウ分布を計算するパッケージ G110[48] が存在する。この中で `RANLAN(x)` が (B.4.16) の逆関数を与えるので、乱数発生器として使える。以下はその使用例。

```
integer i
real x,y,RANLAN

do i=1,1000
  CALL mtcalc(x)
  y=RANLAN(x)
enddo
```

Makefile に`-lmathlib` を加えた上で関数 `RANLAN(x)` の引数として $(0, 1)$ の一様乱数を `real` で与える。ここで `mtcalc(x)` とはメルセンヌ・ツイスタにより $(0, 1)$ の一様乱数を与える独自のサブルーチンである。一般にはこの部分を例えば `x=rand()` などとすれば良い。ランダウ分布は $\kappa < 0.01$ の範囲でのみ使える。

B.6.2 Vavilov 分布 G115,G116

Cernlibrary には Vavilov 分布を計算するパッケージ G115[49],G116[50] が存在する。G116 の方が正確だが、実行スピードが遅く、また、確率密度関数と分布関数のみを与え、その逆関数はパッケージに入ってはいない。一方、G115 は G116 に比べると正確性に劣るが、実行スピードが早く、逆関数が入っているのでそのまま乱数発生器として使える。`VAVRND(x)` がその乱数発生器である。今回のシミュレーションでは G115 を用いた。以下はその使用例。

```
integer i
real x,y,kappa,beta2,VAVRND

CALL VAVSET(kappa,beta2,1)
do i=1,1000
  CALL mtcalc(x)
  y=VAVRND(x)
enddo
```

最初にサブルーチン VAVSET を一度読み込んだ上で、関数 VAVRND(x) の引数として $(0,1)$ の一様乱数を real で与えれば良い。なお、VAVSET の引数は VAVRND(x) を使うときは $\kappa, \beta^2, 1$ である。最後の「1」は MODE の選択で、関数 VAVDEN(x)(これは密度関数を与える) のみを用いるとき「0」として、それ以外の場合は「1」を選択する。Vavilov 分布は $0.01 \leq \kappa \leq 12$ の範囲でのみ使える。

B.7 減衰長 attenuation length

物質中を通る光は、物質と相互作用して光量を落とす。光が物質中を伝播した長さを y、光量を L、最初の光量を L_0 とすると (B.7.1) の関係が成り立つ。

$$L(y) = L_0 \exp\left(-\frac{y}{\lambda}\right) \tag{B.7.1}$$

ここで、光量 L が最初の光量の $1/e$ になる長さ λ を減衰長と呼ぶ。中性子検出器部・VETO 検出器部どちらもシンチレータ両端に光電子増倍管という構造を持つ。それぞれの光電子増倍管単独でパルスハイトを観測したときはこの光の減衰の効果により粒子の入射位置に依存した本来の値よりも低い値を見ることになる。

入射位置の依存性を消すためには相乗 [幾何] 平均 geometric mean をとる。今、図 B.14 のような状況を想定する。縦置きにした長さ A のシンチレータの両端にライトガイドを介さず直接光電子増倍管を接着。シンチレータ下端より y の位置で発光したとする。このとき上部光電子増倍管での光量 $L_{\rm top}$ と下部光電子増倍管での光量 $L_{\rm bottom}$ はそれぞれ次のように書ける。

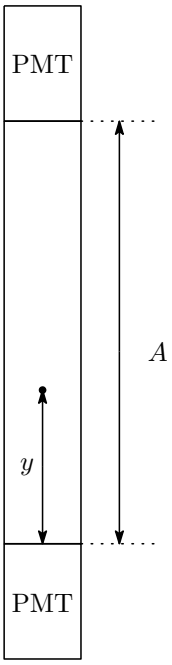


図 B.14: 縦置きのシンチレータ 両端に光電子増倍管 (PMT) シンチレータ長:A 粒子の入射位置 (発光した位置):下から y

$$L(y)_{\rm top} = L_0 \exp\left(-\frac{A-y}{\lambda}\right) \tag{B.7.2}$$

$$L(y)_{\rm bottom} = L_0 \exp\left(-\frac{y}{\lambda}\right) \tag{B.7.3}$$

するとその相乗平均 $L(y)_{\rm GM}$ は

$$\begin{aligned} L(y)_{\rm GM} &= \sqrt{L(y)_{\rm top} \times L(y)_{\rm bottom}} \\ &= L_0 \sqrt{\exp\left(-\frac{A-y}{\lambda} - \frac{y}{\lambda}\right)} \\ &= L_0 \sqrt{\exp\left(-\frac{A}{\lambda}\right)} \end{aligned} \tag{B.7.4}$$

となり、入射位置 y に対する依存性が消える。

シミュレーター中ではシンチレータの入射点と出射点の平均値を発光した点であるとみなして光の減衰の効果を取り入れた。

B.8 飛跡の長さ Flight length

中性子検出器中での平均エネルギー損失はミューオンの検出器中での飛跡の長さ (図 4.3 の赤で示した部分) によって決まる。そして、飛跡の長さ FL は位置 (x, y, z)・角度 (θ, φ) により一意に決まる。以下、FL を示す。

B.8.1 ミューオンのパス

まず、VETO に入射した後のミューオンの中性子検出器を突き抜ける全てのパターンを図 B.15〜図 B.28 に示す。ただし、今回のシミュレーションで想定しているイベントはミューオンが VETO に入射した後、中性子検出器へ入射するというものである。よって NEBULA 背面からの入射等は考えない（測定の際に中性子検出器と VETO のコインシデンスをとり、VETO の信号をスタートトリガーとする）。

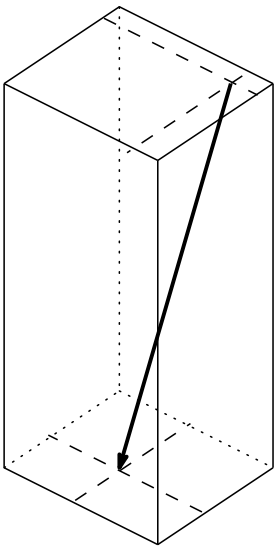


図 B.15: from A to B

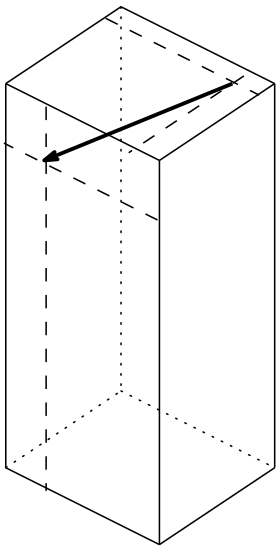


図 B.16: from A to C

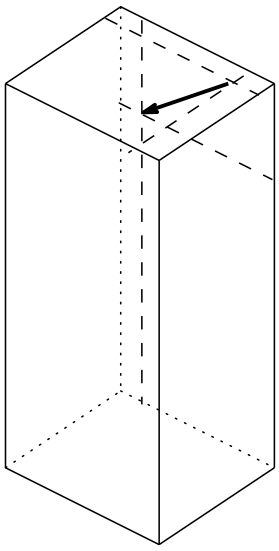


図 B.17: from A to E

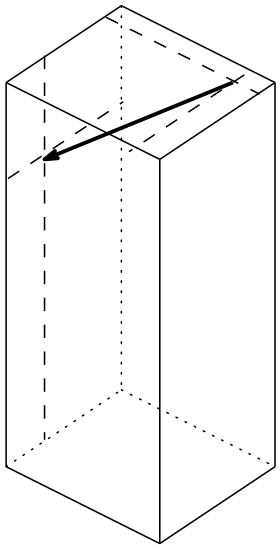


図 B.18: from A to F

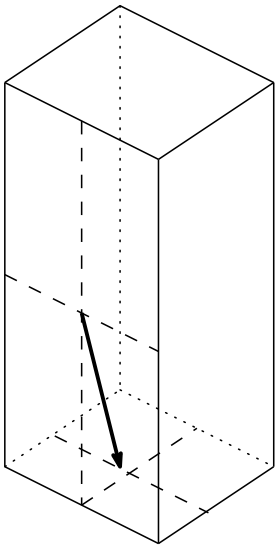


図 B.19: from C to B

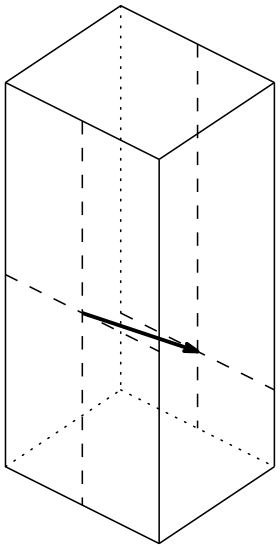


図 B.20: from C to E

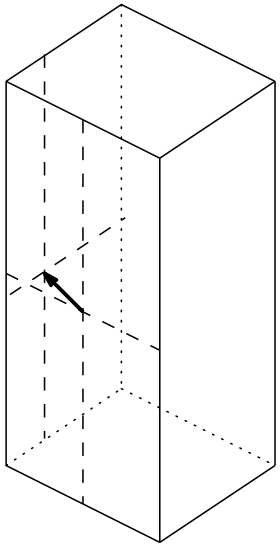


図 B.21: from C to F

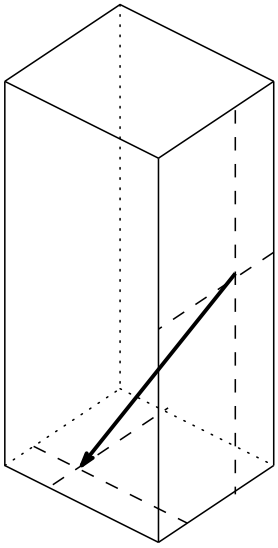


図 B.22: from D to B

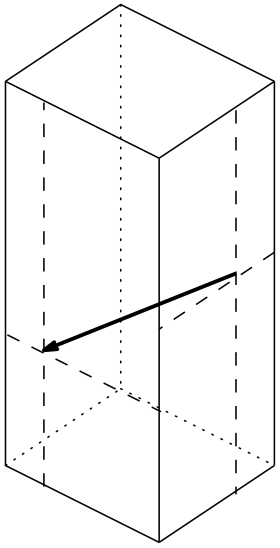


図 B.23: from D to C

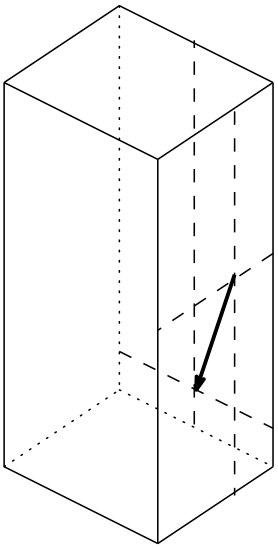


図 B.24: from D to E

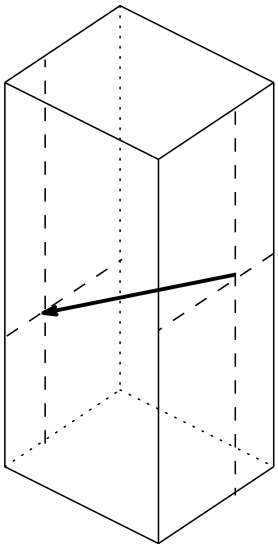


図 B.25: from D to F

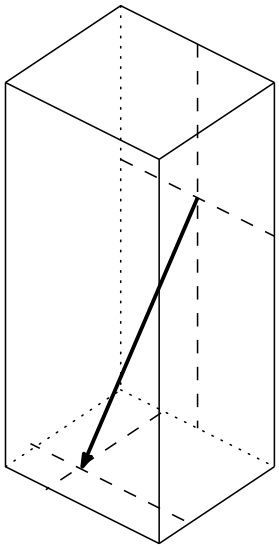


図 B.26: from E to B

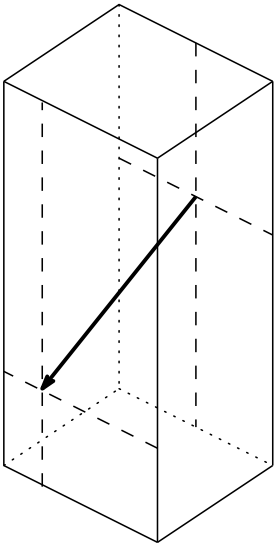


図 B.27: from E to C

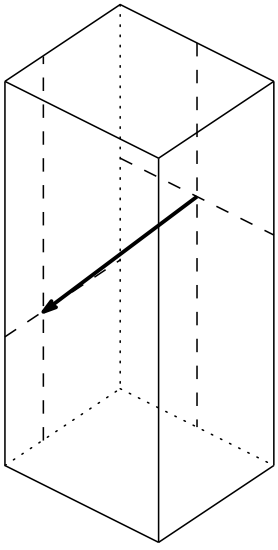


図 B.28: from E to F

B.8.2 全パターンの飛跡の長さ

全パターンの飛跡の長さを独立変数 x, y, θ, φ で表す。ただし、このセクションでは θ は天頂角ではない。θ は水平面からの角度である。よって $\theta = \pi/2 -$ 天頂角 である。

A-B

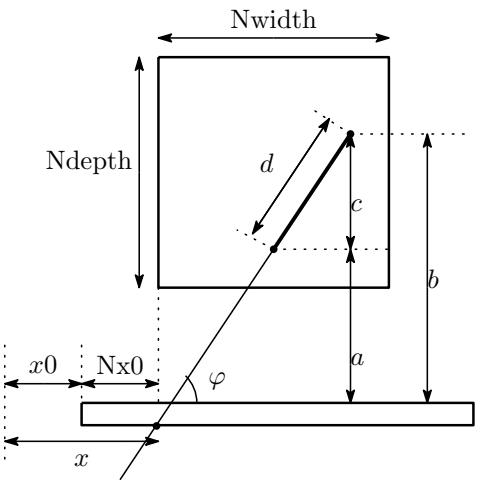


図 B.29: A-B top view

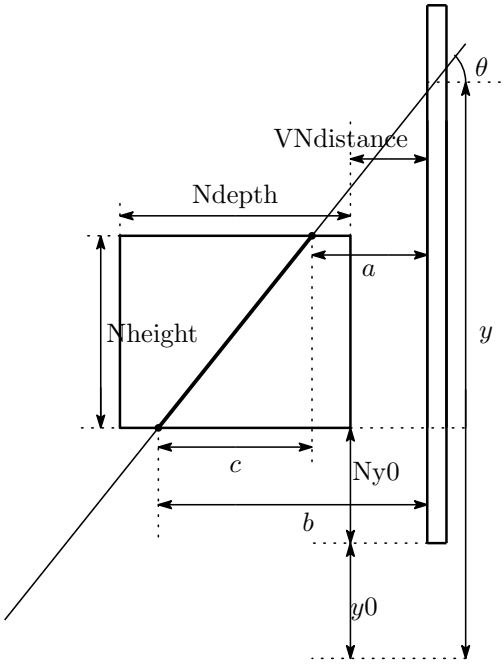


図 B.30: A-B side view

以下、$x_{\rm in}$ は入射点の x 座標,$x_{\rm out}$ は出射点の x 座標を表す。$y_{\rm in}$,$z_{\rm in}$,$y_{\rm out}$,$z_{\rm out}$ も同様である。

$x_{\rm in}$

$$\mathrm{Nx0} \leq x - x0 + a/\tan\varphi < \mathrm{Nx0} + \mathrm{Nwidth} \tag{B.8.1}$$

$z_{\rm in}$

$$\mathrm{VNdistance} \leq (y - y0 - \mathrm{Ny0} - \mathrm{Nheight})/\tan\theta < \mathrm{VNdistance} + \mathrm{Ndepth} \tag{B.8.2}$$

$x_{\rm out}$

$$\mathrm{Nx0} < x - x0 + b/\tan\varphi \leq \mathrm{Nx0} + \mathrm{Nwidth} \tag{B.8.3}$$

$z_{\rm out}$

$$\mathrm{VNdistance} < (y - y0 - \mathrm{Ny0})/\tan\theta \leq \mathrm{VNdistance} + \mathrm{Ndepth} \tag{B.8.4}$$

$\Rightarrow$

$$FL = d/\cos\theta = \mathrm{Nheight}/\sin\theta\sin\varphi \tag{B.8.5}$$

ここで

$$
\begin{aligned}
a &= (y - y0 - \mathrm{Ny0} - \mathrm{Nheight})/\tan\theta \\
b &= (y - y0 - \mathrm{Ny0})/\tan\theta \\
c &= b - a \\
&= \mathrm{Nheight}/\tan\theta \\
d &= c/\sin\varphi \\
&= (\mathrm{Nheight}/\tan\theta\sin\varphi
\end{aligned}
\tag{B.8.6}
$$

A-C

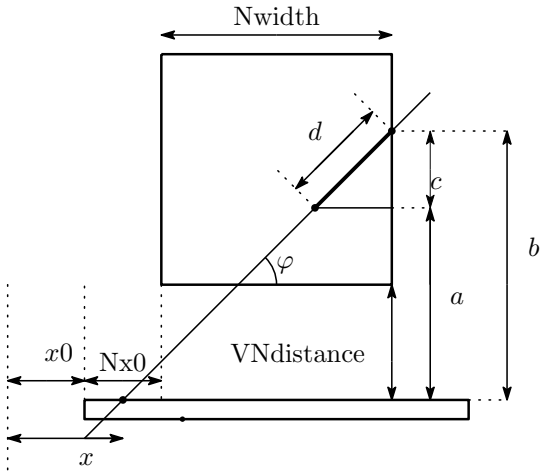


図 B.31: A-C top view

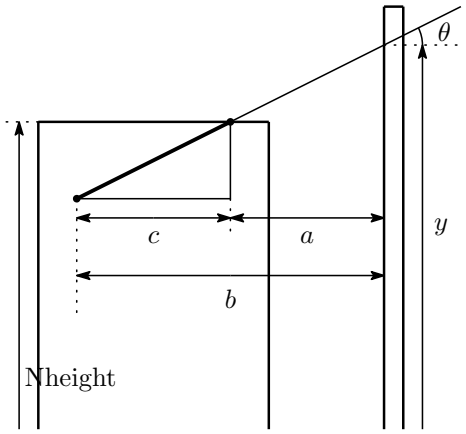


図 B.32: A-C side view

x_{in}

$$\mathrm{Nx0} \le x - x0 + a/\tan\varphi < \mathrm{Nx0} + \mathrm{Nwidth} \tag{B.8.7}$$

z_{in}

$$\mathrm{VNdistance} \le (y - y0 - \mathrm{Ny0} - \mathrm{Nheight})/\tan\theta < \mathrm{VNdistance} + \mathrm{Ndepth} \tag{B.8.8}$$

y_{out}

$$\mathrm{Ny0} < y - y0 - b\tan\theta < \mathrm{Ny0} + \mathrm{Nheight} \tag{B.8.9}$$

z_{out}

$$\mathrm{VNdistance} < (\mathrm{Nx0} + \mathrm{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi < \mathrm{VNdistance} + \mathrm{Ndepth} \tag{B.8.10}$$

$\Rightarrow$

$$FL = d/\cos\theta = \{(\mathrm{Nx0} + \mathrm{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi - (y - y0 - \mathrm{Ny0} - \mathrm{Nheight})/\tan\theta\}/\sin\varphi\cos\theta \tag{B.8.11}$$

ここで

$$
\begin{aligned}
a &= (y - y0 - \mathrm{Ny0} - \mathrm{Nheight})/\tan\theta \\
b &= (\mathrm{Nx0} + \mathrm{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi \\
c &= b - a \\
&= (\mathrm{Nx0} + \mathrm{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi - (y - y0 - \mathrm{Ny0} - \mathrm{Nheight})/\tan\theta \\
d &= c/\sin\varphi \\
&= \{(\mathrm{Nx0} + \mathrm{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi - (y - y0 - \mathrm{Ny0} - \mathrm{Nheight})/\tan\theta\}/\sin\varphi
\end{aligned}
\tag{B.8.12}
$$

A-E

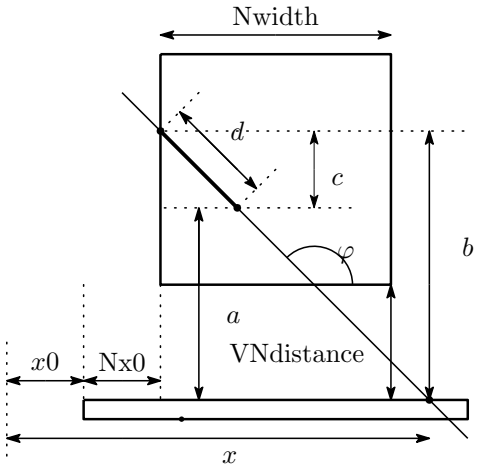


図 B.33: A-E top view

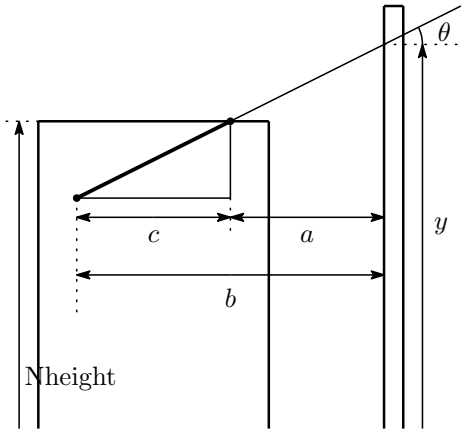


図 B.34: A-E side view

x_{in}

$$\mathrm{Nx0} \le x - x0 + a/\tan\varphi < \mathrm{Nx0} + \mathrm{Nwidth} \tag{B.8.13}$$

z_{in}

$$\mathrm{VNdistance} \le (y - y0 - \mathrm{Ny0} - \mathrm{Nheight})/\tan\theta < \mathrm{VNdistance} + \mathrm{Ndepth} \tag{B.8.14}$$

y_{out}

$$\mathrm{Ny0} < y - y0 - b\tan\theta < \mathrm{Ny0} + \mathrm{Nheight} \tag{B.8.15}$$

z_{out}

$$\mathrm{VNdistance} < (\mathrm{Nx0} - x + x0)\tan\varphi < \mathrm{VNdistance} + \mathrm{Ndepth} \tag{B.8.16}$$

⇒

$$FL = d/\cos\theta = \{(\mathrm{Nx0} - x + x0)\tan\varphi - (y - y0 - \mathrm{Ny0} - \mathrm{Nheight})/\tan\theta\}/\sin\varphi\cos\theta \tag{B.8.17}$$

ここで

$$
\begin{aligned}
a &= (y - y0 - \mathrm{Ny0} - \mathrm{Nheight})/\tan\theta \\
b &= (\mathrm{Nx0} - x + x0)\tan\varphi \\
c &= b - a \\
&= (\mathrm{Nx0} - x + x0)\tan\varphi - (y - y0 - \mathrm{Ny0} - \mathrm{Nheight})/\tan\theta \\
d &= c/\sin\varphi \\
&= \{(\mathrm{Nx0} - x + x0)\tan\varphi - (y - y0 - \mathrm{Ny0} - \mathrm{Nheight})/\tan\theta\}/\sin\varphi
\end{aligned}
\tag{B.8.18}
$$

A-F

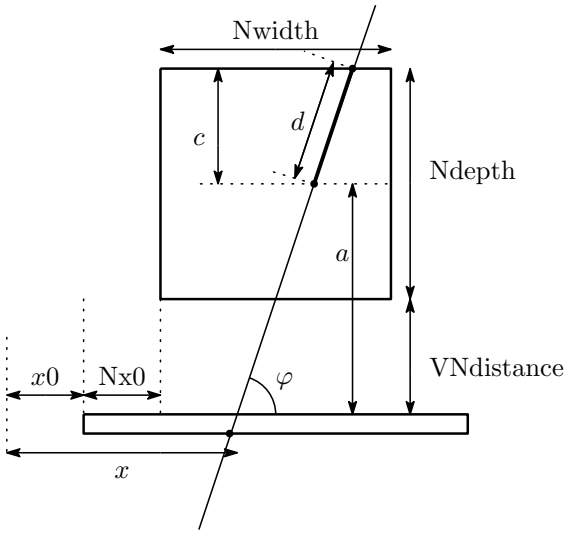


図 B.35: A-F top view

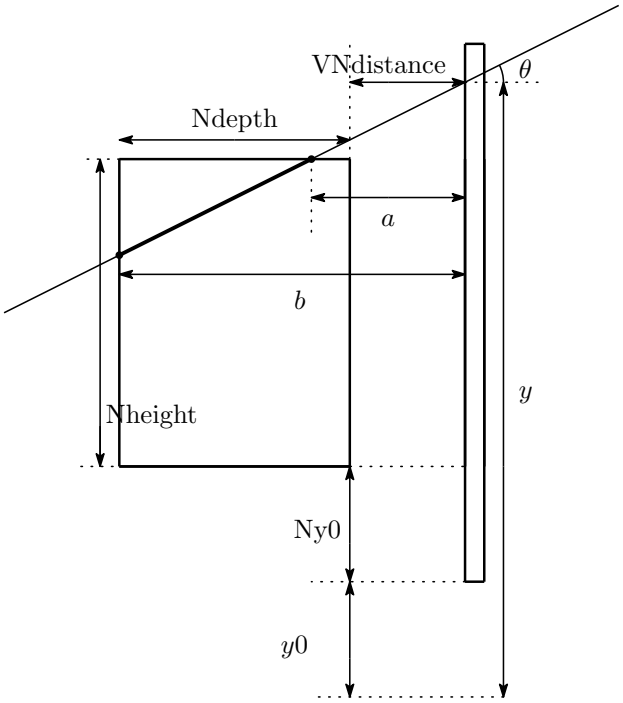


図 B.36: A-F side view

x_{in}

$$\mathrm{Nx0} \le x - x0 + a/\tan\varphi < \mathrm{Nx0} + \mathrm{Nwidth} \tag{B.8.19}$$

z_{in}

$$\mathrm{VNdistance} \le (y - y0 - \mathrm{Ny0} - \mathrm{Nheight})/\tan\theta < \mathrm{VNdistance} + \mathrm{Ndepth} \tag{B.8.20}$$

x_{out}

$$\mathrm{Nx0} < x - x0 + (\mathrm{Ndepth} + \mathrm{VNdistance})/\tan\varphi \le \mathrm{Nx0} + \mathrm{Nwidth} \tag{B.8.21}$$

y_{out}

$$\mathrm{Ny0} \le y - y0 - b\tan\theta < \mathrm{Ny0} + \mathrm{Nheight} \tag{B.8.22}$$

$\Rightarrow$

$$FL = d/\cos\theta = \{\text{Ndepth} + \text{VNdistance} - (y - y0 - \text{Ny0} - \text{Nheight})/\tan\theta\}/\sin\varphi\cos\theta \tag{B.8.23}$$

ここで

$$\begin{aligned} a &= (y - y0 - \text{Ny0} - \text{Nheight})/\tan\theta \\ b &= \text{Ndepth} + \text{VNdistance} \\ c &= b - a \\ &= \text{Ndepth} + \text{VNdistance} - (y - y0 - \text{Ny0} - \text{Nheight})/\tan\theta \\ d &= c/\sin\varphi \\ &= \{\text{Ndepth} + \text{VNdistance} - (y - y0 - \text{Ny0} - \text{Nheight})/\tan\theta\}/\sin\varphi \end{aligned} \tag{B.8.24}$$

C-B

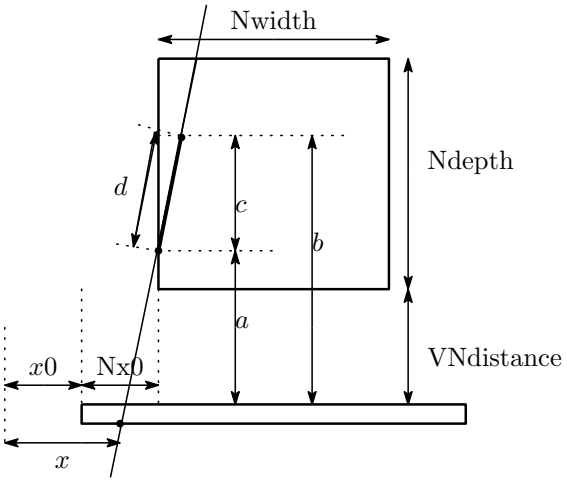


図 B.37: C-B top view

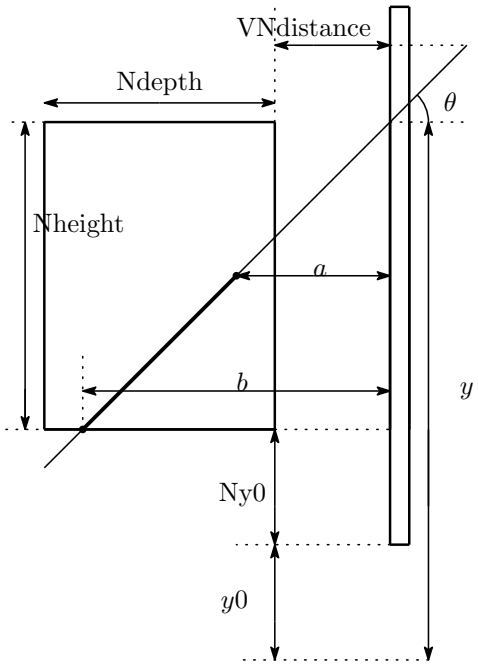


図 B.38: C-B side view

y_{in}

$$\text{Ny0} < y - y0 - a\tan\theta < \text{Ny0} + \text{Nheight} \tag{B.8.25}$$

z_{in}

$$\text{VNdistance} < (\text{Nx0} - x + x0)\tan\varphi < \text{VNdistance} + \text{Ndepth} \tag{B.8.26}$$

x_{out}

$$\text{Nx0} < x - x0 + b/\tan\varphi \leq \text{Nx0} + \text{Nwidth} \tag{B.8.27}$$

z_{out}

$$\text{VNdistance} < (y - y0 - \text{Ny0})/\tan\theta \leq \text{VNdistance} + \text{Ndepth} \tag{B.8.28}$$

⇒

$$FL = d/\cos\theta = \{(y - y0 - \mathrm{Ny0})/\tan\theta - (\mathrm{Nx0} - x + x0)\tan\varphi\}/\sin\varphi\cos\theta \tag{B.8.29}$$

ここで

$$\begin{aligned} a &= (\mathrm{Nx0} - x + x0)\tan\varphi \\ b &= (y - y0 - \mathrm{Ny0})/\tan\theta \\ c &= b - a \\ &= (y - y0 - \mathrm{Ny0})/\tan\theta - (\mathrm{Nx0} - x + x0)\tan\varphi \\ d &= c/\sin\varphi \\ &= \{(y - y0 - \mathrm{Ny0})/\tan\theta - (\mathrm{Nx0} - x + x0)\tan\varphi\}/\sin\varphi \end{aligned} \tag{B.8.30}$$

C-E

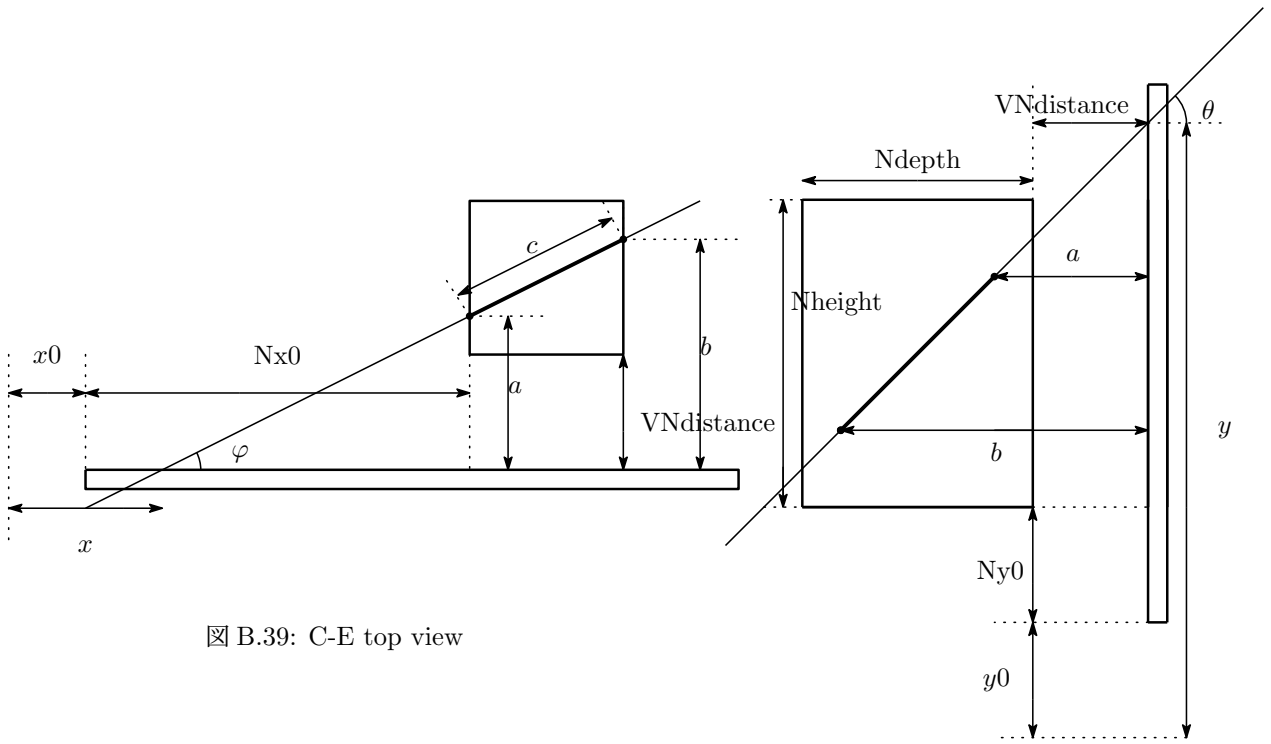


図 B.39: C-E top view

図 B.40: C-E side view

y_{in}

$$\mathrm{Ny0} < y - y0 - a\tan\theta < \mathrm{Ny0} + \mathrm{Nheight} \tag{B.8.31}$$

z_{in}

$$\mathrm{VNdistance} < (\mathrm{Nx0} - x + x0)\tan\varphi < \mathrm{VNdistance} + \mathrm{Ndepth} \tag{B.8.32}$$

y_{out}

$$\mathrm{Ny0} < y - y0 - b\tan\theta < \mathrm{Ny0} + \mathrm{Nheight} \tag{B.8.33}$$

$z_{\rm out}$

$$\text{VNdistance} < (\text{Nx0} + \text{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi < \text{VNdistance} + \text{Ndepth} \tag{B.8.34}$$

⇒

$$FL = c/\cos\theta = \text{Nwidth}/\cos\varphi\cos\theta \tag{B.8.35}$$

ここで

$$a = (\text{Nx0} - x + x0)\tan\varphi$$
$$b = (\text{Nx0} + \text{Nwidth} - x + x0))\tan\varphi \tag{B.8.36}$$
$$c = \text{Nwidth}/\cos\varphi \tag{B.8.37}$$

C-F

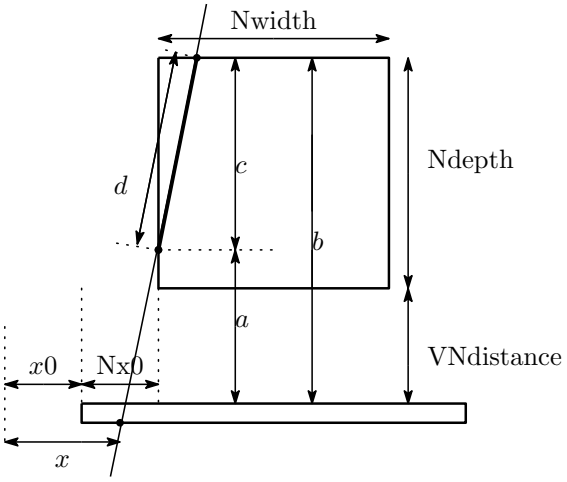


図 B.41: C-F top view

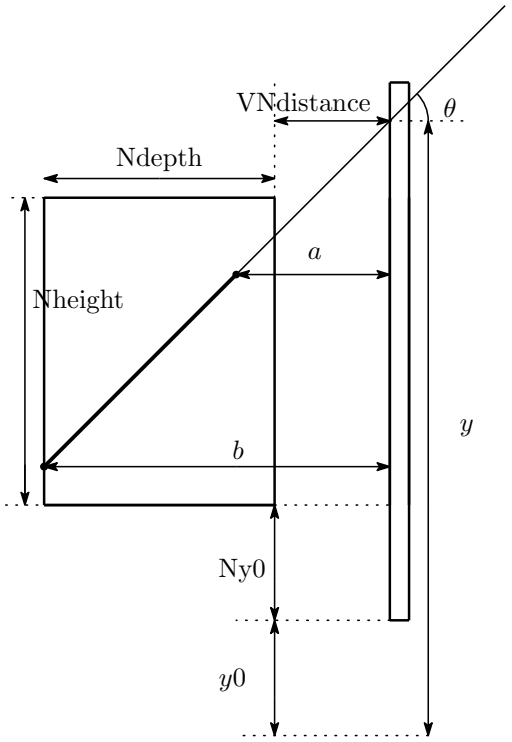


図 B.42: C-F side view

$y_{\rm in}$

$$\text{Ny0} < y - y0 - a\tan\theta < \text{Ny0} + \text{Nheight} \tag{B.8.38}$$

$z_{\rm in}$

$$\text{VNdistance} < (\text{Nx0} - x + x0)\tan\varphi < \text{VNdistance} + \text{Ndepth} \tag{B.8.39}$$

$x_{\rm out}$

$$\text{Nx0} < x - x0 + (\text{Ndepth} + \text{VNdistance})/\tan\varphi \leq \text{Nx0} + \text{Nwidth} \tag{B.8.40}$$

$y_{\rm out}$

$$\mathrm{Ny0} < y - y0 - (\mathrm{VNdistance} + \mathrm{Ndepth}) \tan\theta < \mathrm{Ny0} + \mathrm{Nheight} \tag{B.8.41}$$

⇒

$$FL = d/\cos\theta = \{\mathrm{VNdistance} + \mathrm{Ndepth} - (\mathrm{Nx0} - x + x0) \tan\varphi\}/\sin\varphi\cos\theta \tag{B.8.42}$$

ここで

$$\begin{aligned} a &= (\mathrm{Nx0} - x + x0) \tan\varphi \\ b &= \mathrm{VNdistance} + \mathrm{Ndepth} \\ c &= b - a \\ &= \mathrm{VNdistance} + \mathrm{Ndepth} - (\mathrm{Nx0} - x + x0) \tan\varphi \\ d &= c/\sin\varphi \\ &= \{\mathrm{VNdistance} + \mathrm{Ndepth} - (\mathrm{Nx0} - x + x0) \tan\varphi\}/\sin\varphi \end{aligned} \tag{B.8.43}$$

D-B

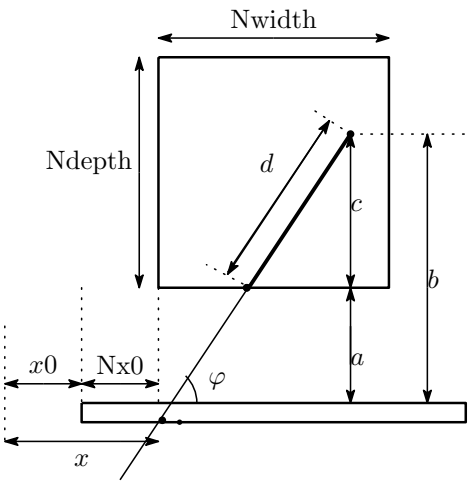


図 B.43: D-B top view

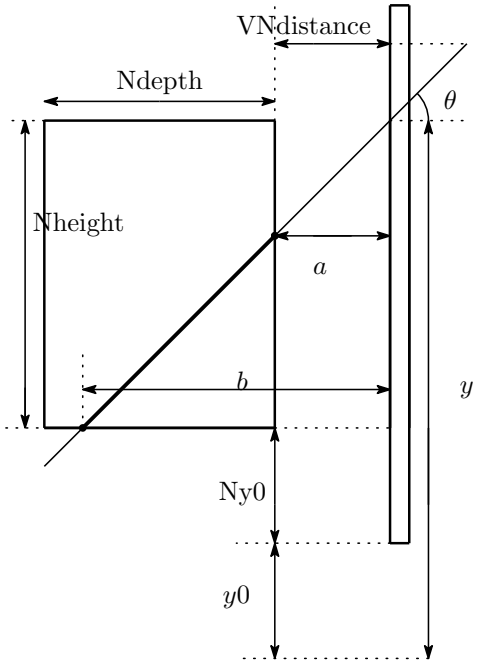


図 B.44: D-B side view

$x_{\rm in}$

$$\mathrm{Nx0} \le x - x0 + \mathrm{VNdistance}/\tan\varphi < \mathrm{Nx0} + \mathrm{Nwidth} \tag{B.8.44}$$

$y_{\rm in}$

$$\mathrm{Ny0} < y - y0 - \mathrm{VNdistance}\tan\theta \le \mathrm{Ny0} + \mathrm{Nheight} \tag{B.8.45}$$

x_{out}

$$\text{Nx0} < x - x0 + b/\tan\varphi \leq \text{Nx0} + \text{Nwidth} \tag{B.8.46}$$

z_{out}

$$\text{VNdistance} < (y - y0 - \text{Ny0})/\tan\theta \leq \text{VNdistance} + \text{Ndepth} \tag{B.8.47}$$

⇒

$$FL = d/\cos\theta = \{(y - y0 - \text{Ny0})/\tan\theta - \text{VNdistance}\}/\sin\varphi\cos\theta \tag{B.8.48}$$

ここで

$$\begin{aligned} a &= \text{VNdistance} \\ b &= (y - y0 - \text{Ny0})/\tan\theta \\ c &= b - a \\ &= (y - y0 - \text{Ny0})/\tan\theta - \text{VNdistance} \\ d &= c/\sin\varphi \\ &= \{(y - y0 - \text{Ny0})/\tan\theta - \text{VNdistance}\}/\sin\varphi \end{aligned} \tag{B.8.49}$$

D-C

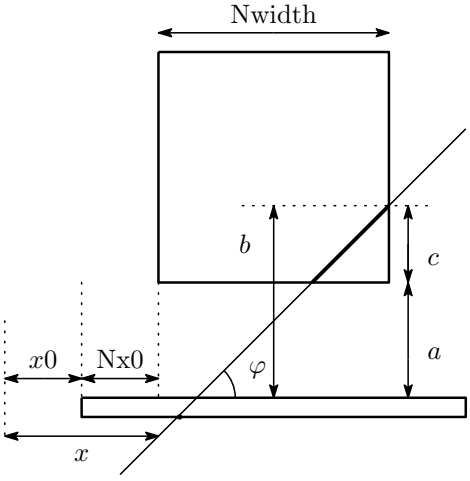


図 B.45: D-C top view

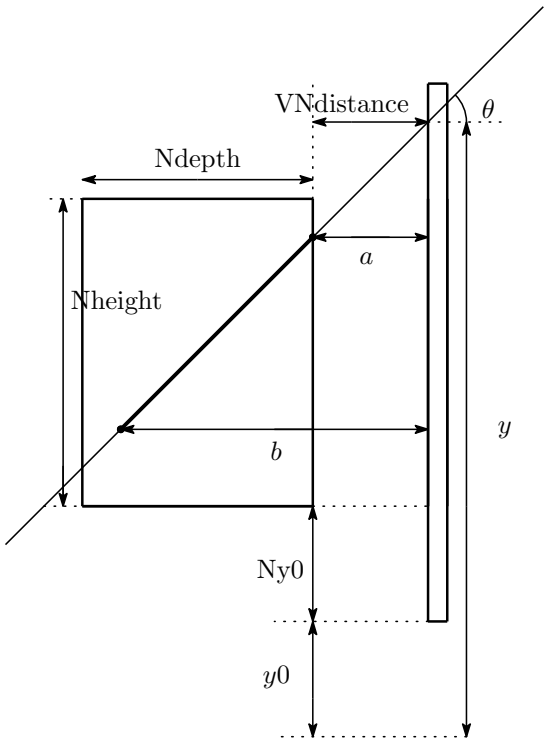


図 B.46: D-C side view

x_{in}

$$\text{Nx0} \leq x - x0 + \text{VNdistance}/\tan\varphi < \text{Nx0} + \text{Nwidth} \tag{B.8.50}$$

y_{in}

$$\text{Ny0} < y - y0 - \text{VNdistance}\tan\theta < \text{Ny0} + \text{Nheight} \tag{B.8.51}$$

y_{out}

$$\text{Ny0} < y - y0 - b\tan\theta < \text{Ny0} + \text{Nheight} \tag{B.8.52}$$

z_{out}

$$\text{VNdistance} < (\text{Nx0} + \text{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi < \text{VNdistance} + \text{Ndepth} \tag{B.8.53}$$

$\Rightarrow$

$$FL = d/\cos\theta = \{(\text{Nx0} + \text{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi - \text{VNdistance}\}/\sin\varphi\cos\theta \tag{B.8.54}$$

ここで

$$\begin{aligned} a &= \text{VNdistance} \\ b &= (\text{Nx0} + \text{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi \\ c &= b - a \\ &= (\text{Nx0} + \text{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi - \text{VNdistance} \\ d &= c/\sin\varphi \\ &= \{(\text{Nx0} + \text{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi - \text{VNdistance}\}/\sin\varphi \end{aligned}$$

D-E

x_{in}

$$\text{Nx0} \le x - x0 + \text{VNdistance}/\tan\varphi < \text{Nx0} + \text{Nwidth} \tag{B.8.55}$$

y_{in}

$$\text{Ny0} < y - y0 - \text{VNdistance}\tan\theta < \text{Ny0} + \text{Nheight} \tag{B.8.56}$$

y_{out}

$$\text{Ny0} < y - y0 - b\tan\theta < \text{Ny0} + \text{Nheight} \tag{B.8.57}$$

z_{out}

$$\text{VNdistance} < (\text{Nx0} - x + x0)\tan\varphi < \text{VNdistance} + \text{Ndepth} \tag{B.8.58}$$

$\Rightarrow$

$$FL = d/\cos\theta = \{(\text{Nx0} - x + x0)\tan\varphi - \text{VNdistance}\}/\sin\varphi\cos\theta \tag{B.8.59}$$

ここで

$$\begin{aligned} a &= \text{VNdistance} \\ b &= (\text{Nx0} - x + x0)\tan\varphi \\ c &= b - a \\ &= (\text{Nx0} - x + x0)\tan\varphi - \text{VNdistance} \\ d &= c/\sin\varphi \\ &= \{(\text{Nx0} - x + x0)\tan\varphi - \text{VNdistance}\}/\sin\varphi \end{aligned}$$

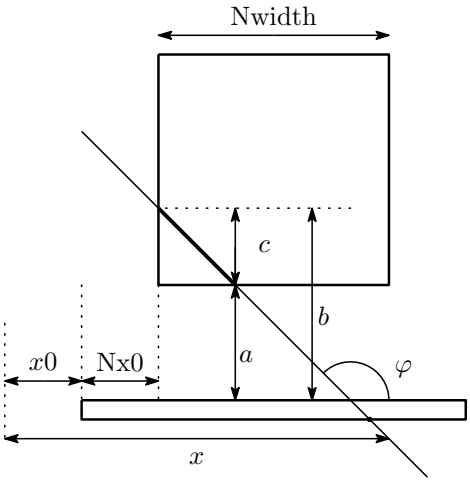


図 B.47: D-E top view

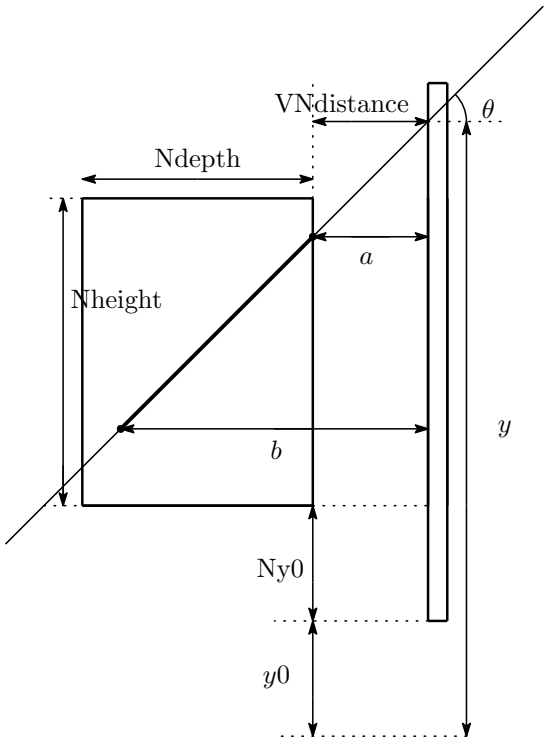


図 B.48: D-E side view

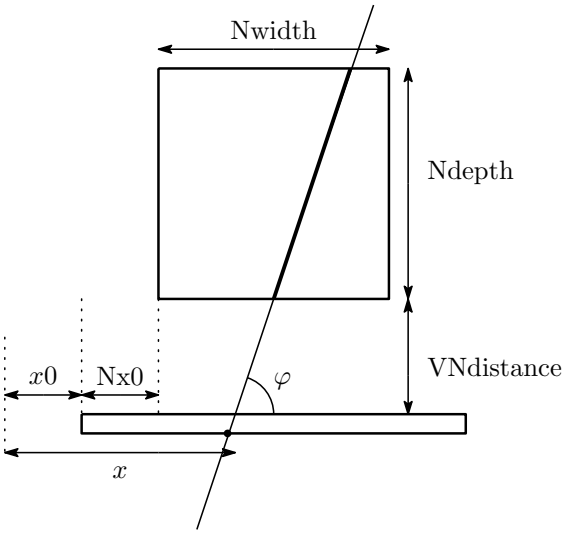


図 B.49: D-F top view

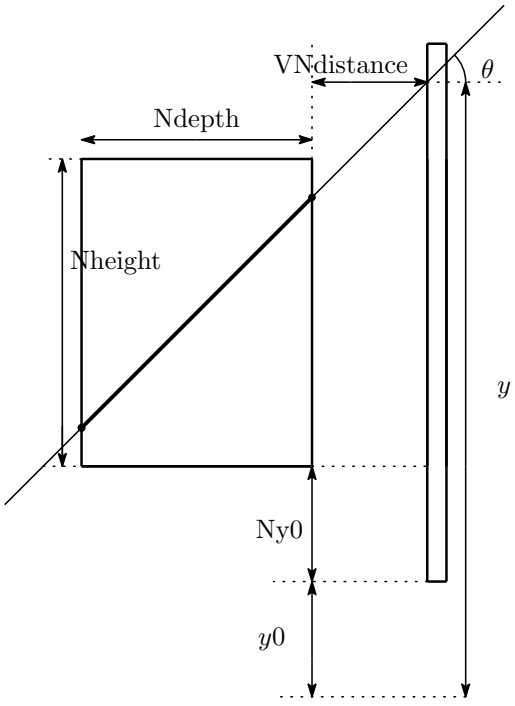


図 B.50: D-F side view

D-F

x_{in}

$$\text{Nx0} \leq x - x0 + (\text{VNdistance}/\tan\varphi) < \text{Nx0} + \text{Nwidth} \tag{B.8.60}$$

y_{in}

$$\text{Ny0} < y - y0 - \text{VNdistance}\tan\theta < \text{Ny0} + \text{Nheight} \tag{B.8.61}$$

x_{out}

$$\text{Nx0} < x - x0 + (\text{Ndepth} + \text{VNdistance})/\tan\varphi \leq \text{Nx0} + \text{Nwidth} \tag{B.8.62}$$

y_{out}

$$\text{Ny0} < y - y0 - (\text{VNdistance} + \text{Ndepth})\tan\theta < \text{Ny0} + \text{Nheight} \tag{B.8.63}$$

$\Rightarrow$

$$FL = \text{Ndepth}/\sin\varphi\cos\theta \tag{B.8.64}$$

E-B

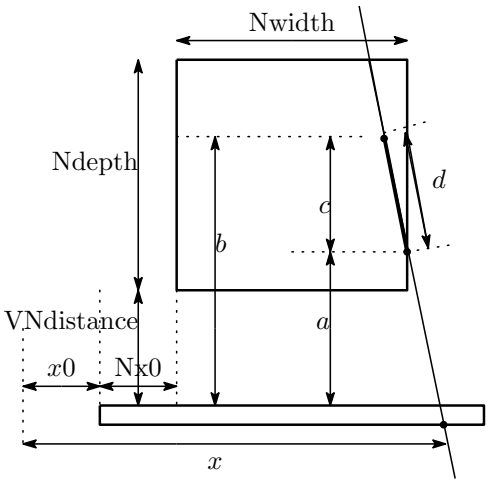


図 B.51: E-B top view

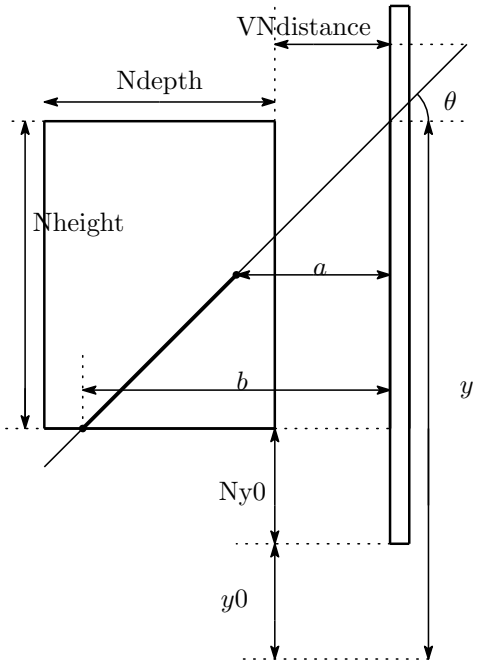


図 B.52: E-B side view

y_{in}

$$\text{Ny0} < y - y0 - a\tan\theta < \text{Ny0} + \text{Nheight} \tag{B.8.65}$$

z_{in}

$$\text{VNdistance} < (\text{Nx0} + \text{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi < \text{VNdistance} + \text{Ndepth} \tag{B.8.66}$$

$x_{\rm out}$

$$\mathrm{Nx0} \le x - x0 + b/\tan\varphi < \mathrm{Nx0} + \mathrm{Nwidth} \tag{B.8.67}$$

$z_{\rm out}$

$$\mathrm{VNdistance} < (y - y0 - \mathrm{Ny0})/\tan\theta \le \mathrm{VNdistance} + \mathrm{Ndepth} \tag{B.8.68}$$

$\Rightarrow$

$$FL = d/\cos\theta = \{(y - y0 - \mathrm{Ny0})/\tan\theta - (\mathrm{Nx0} + \mathrm{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi\}/\sin\varphi\cos\theta \tag{B.8.69}$$

ここで

$$\begin{aligned} a &= (\mathrm{Nx0} + \mathrm{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi \\ b &= (y - y0 - \mathrm{Ny0})/\tan\theta \\ c &= b - a \\ &= (y - y0 - \mathrm{Ny0})/\tan\theta - (\mathrm{Nx0} + \mathrm{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi \\ d &= c/\sin\varphi \\ &= \{(y - y0 - \mathrm{Ny0})/\tan\theta - (\mathrm{Nx0} + \mathrm{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi\}/\sin\varphi \end{aligned} \tag{B.8.70}$$

E-C

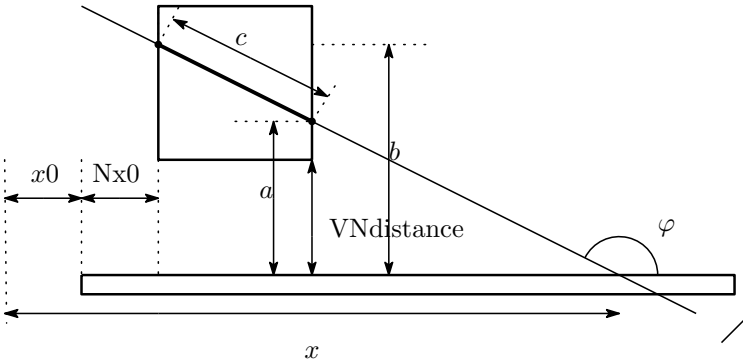


図 B.53: E-C top view

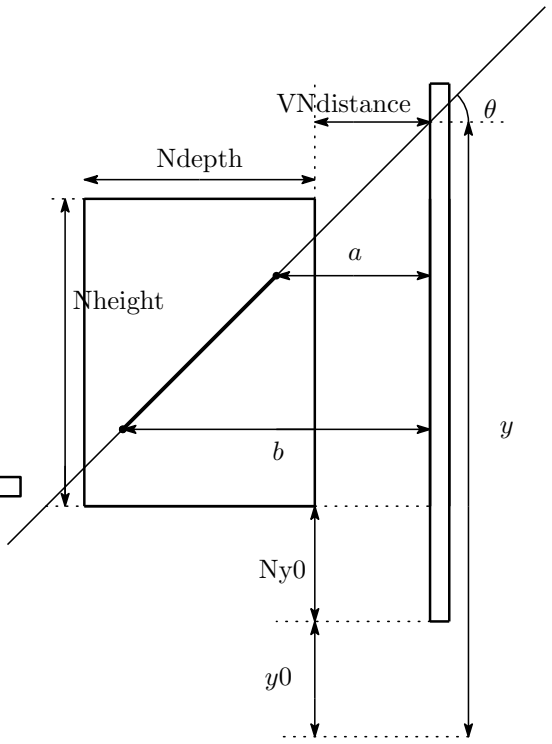


図 B.54: E-C side view

$y_{\rm in}$

$$\mathrm{Ny0} < y - y0 - a\tan\theta < \mathrm{Ny0} + \mathrm{Nheight} \tag{B.8.71}$$

$z_{\rm in}$

$$\text{VNdistance} < (\text{Nx0} + \text{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi < \text{VNdistance} + \text{Ndepth} \tag{B.8.72}$$

$y_{\rm out}$

$$\text{Ny0} < y - y0 - b\tan\theta < \text{Ny0} + \text{Nheight} \tag{B.8.73}$$

$z_{\rm out}$

$$\text{VNdistance} < (\text{Nx0} - x + x0)\tan\varphi < \text{VNdistance} + \text{Ndepth} \tag{B.8.74}$$

$\Rightarrow$

$$FL = c/\cos\theta = -\text{Nwidth}/\cos\varphi\cos\theta \tag{B.8.75}$$

ここで

$$a = (\text{Nx0} + \text{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi$$
$$b = (\text{Nx0} - x + x0))\tan\varphi \tag{B.8.76}$$
$$c = -\text{Nwidth}/\cos\varphi \tag{B.8.77}$$

E-F

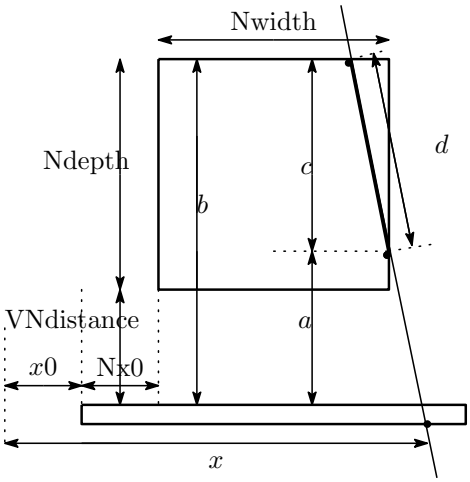


図 B.55: E-F top view

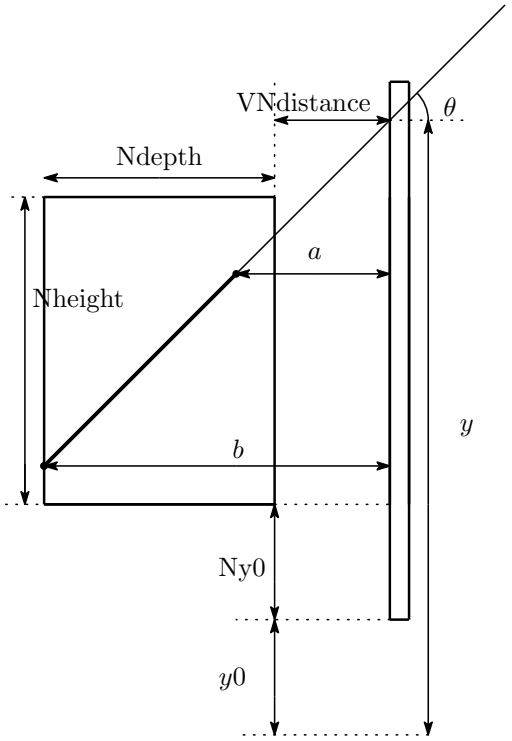


図 B.56: E-F side view

$y_{\rm in}$

$$\text{Ny0} < y - y0 - a\tan\theta < \text{Ny0} + \text{Nheight} \tag{B.8.78}$$

$z_{\rm in}$

$$\text{VNdistance} < (\text{Nx0} + \text{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi < \text{VNdistance} + \text{Ndepth} \tag{B.8.79}$$

$x_{\rm out}$

$$\text{Nx0} \leq x - x0 + (\text{Ndepth} + \text{VNdistance})/\tan\varphi < \text{Nx0} + \text{Nwidth} \tag{B.8.80}$$

$y_{\rm out}$

$$\text{Ny0} < y - y0 - (\text{VNdistance} + \text{Ndepth})\tan\theta < \text{Ny0} + \text{Nheight} \tag{B.8.81}$$

$\Rightarrow$

$$FL = d/\cos\theta = \{\text{VNdistance} + \text{Ndepth} - (\text{Nx0} + \text{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi\}/\sin\varphi\cos\theta \tag{B.8.82}$$

ここで

$$\begin{aligned} a &= (\text{Nx0} + \text{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi \\ b &= \text{VNdistance} + \text{Ndepth} \\ c &= b - a \\ &= \text{VNdistance} + \text{Ndepth} - (\text{Nx0} + \text{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi \\ d &= c/\sin\varphi \\ &= \{\text{VNdistance} + \text{Ndepth} - (\text{Nx0} + \text{Nwidth} - x + x0)\tan\varphi\}/\sin\varphi \end{aligned} \tag{B.8.83}$$

B.9 VETO でのカウントレート

ミューオンの単位垂直面あたりのフラックス J_v は次式で与えられる

$$J_v = \int_{\theta\leq\pi/2} j(\theta,\varphi)\sin\theta d\Omega \tag{B.9.1}$$

ここで $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$, $j(\theta,\varphi) = 90\cos^2\theta$
係数 90 は Rossi 点の値に地磁気補正の後、1.25 倍をした値 [51] を採用した。
よって VETO を通過するミューオンのカウントレートは

$$\begin{aligned} J &= \int_0^{\text{Vwidth}} dx \int_0^{\text{Vheight}} dy J_v \\ &= \int_0^{0.32} dx \int_0^{1.9} dy \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} d\theta 90\cos^2\theta\sin^2\theta \\ &= 0.32\cdot 1.9\cdot 2\pi\cdot 90\cdot\frac{\pi}{16} \\ &= 67\ [/\text{cps}] \end{aligned} \tag{B.9.2}$$

上述の計算の確認のため、手のひらに入射する宇宙線の数を計算した。水平面の場合、 (B.9.1) において $\sin\theta$ を $\cos\theta$ に置き換えて

$$J_h = \int_{\theta\leq\pi/2} j(\theta,\varphi)\cos\theta d\Omega \tag{B.9.3}$$

手のひらが 0.1[m]$\times$ 0.1[m] とすると、ミューオンのフラックス $J_{\rm palm}$ は

$$
\begin{aligned}
J_{\mathrm{palm}} &= \int_0^{0.1} dx \int_0^{0.1} dy \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} d\theta 80 \cos^3\theta \sin\theta \\
&= 0.1 \cdot 0.1 \cdot 2\pi \cdot 90 \cdot \frac{1}{4} \\
&= 1.4 \ [\mathrm{cps}]
\end{aligned} \tag{B.9.4}
$$

となる。

B.10 コンクリート・土壌による補正

B.10.1 座標系の設定

RIBF 実験棟のコンクリート中でのエネルギー損失を再現するため以下のような座標系を設定する。まず、VETO と中性子検出器を配置した時の飛跡の長さを計算するための座標系を図 B.57 に示す。

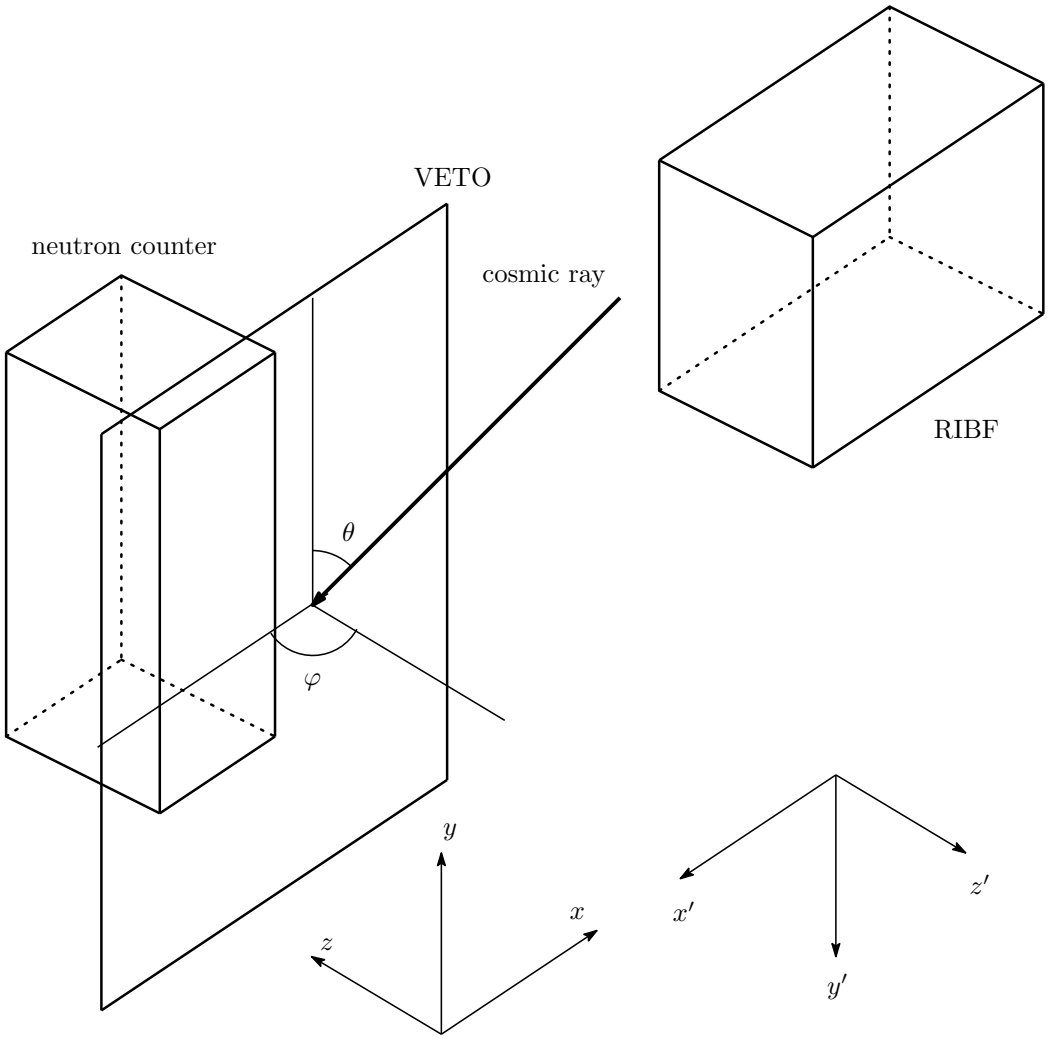


図 B.57: 対中性子検出器用の座標系 : RIBF の建物を簡素な直方体で示した。

この座標系 (x, y, z, θ, ϕ) で中性子検出器中の飛跡の長さを計算していたが、これを反転させた座標系 $(x', y', z', \theta', \phi')$ を以下のように設定する (図 B.58)。

$$x' = -x + x_{\mathrm{origin}} \tag{B.10.1}$$
$$y' = -y + y_{\mathrm{origin}} \tag{B.10.2}$$
$$z' = -z \tag{B.10.3}$$
$$\theta' = \theta \tag{B.10.4}$$
$$\phi' = \phi \tag{B.10.5}$$

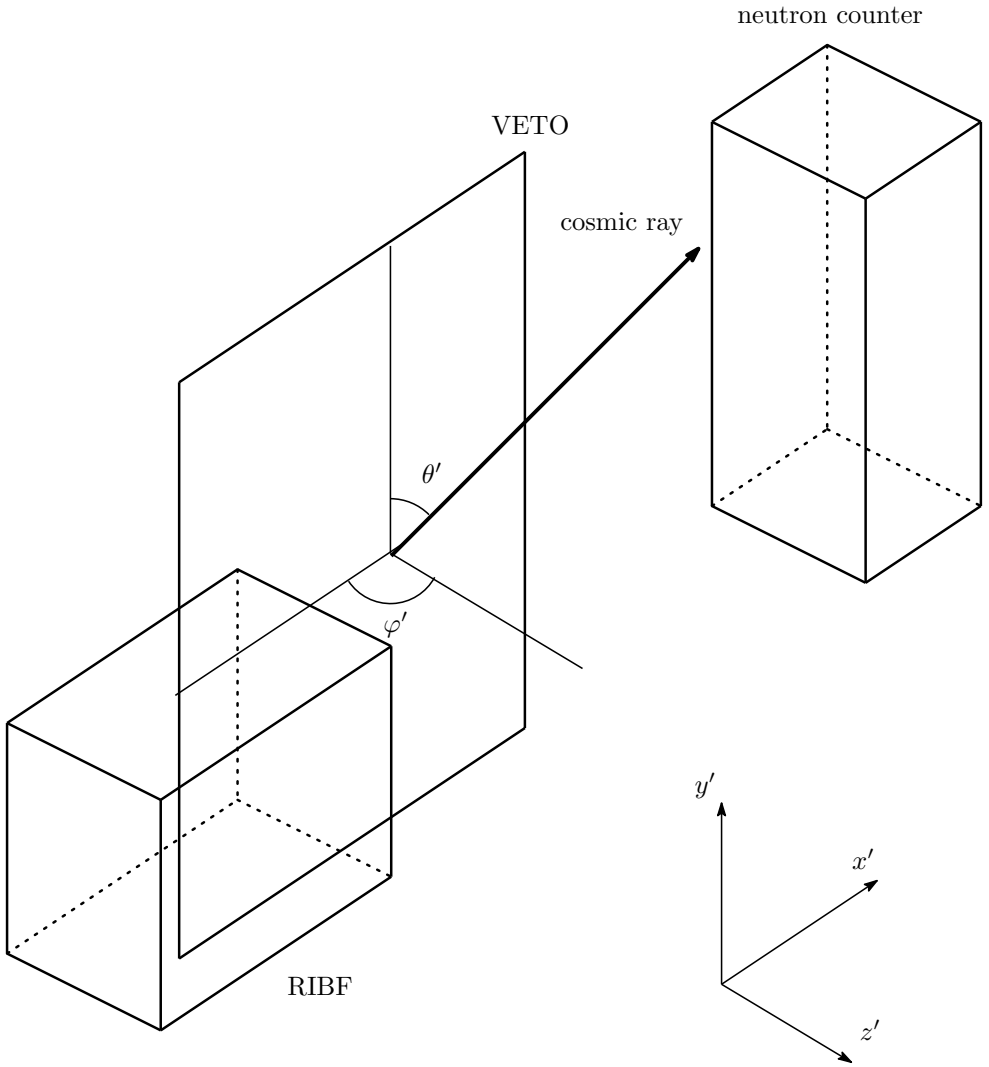


図 B.58: 対 RIBF 用の反転座標系

ここで、$x_{\mathrm{origin}}, y_{\mathrm{origin}}$ はもともとの座標系の原点と反転させた座標系の原点の x, y 方向のずれである。両座標系において z 軸、z' 軸の原点を VETO 上にとっており、両座標系の原点の z 方向のずれが無いため z_{origin} は存在しない。$x_{\mathrm{origin}}, y_{\mathrm{origin}}$ は建物の構造、その建物の中での NEBULA の配置、座標系の取り方に依存する。建物の構造は RIBF

の設計図から決定される。NEBULA の配置も測定済みの現在の位置情報を使えば良い。座標系の取り方であるが、VETO-中性子検出器間の座標系についてはその原点座標を

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{架台左の柱の右側面} \\ \text{VETO のプラスチックシンチレータ下端} \\ \text{手前側の VETO のビーム軸方向の位置} \end{pmatrix} \tag{B.10.6}$$

と定義した。一方、RIBF 用の反転させた座標系の原点は

$$\begin{pmatrix} x'_0 \\ y'_0 \\ z'_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{B10} \\ \text{RIBF 実験棟天井の位置} \\ \text{手前側の VETO のビーム軸方向の位置} \end{pmatrix} \tag{B.10.7}$$

と定義した。ただし、B10 とは設計図上に示された断面であり、ビームライン最下流の壁を含む面のことである。この定義の上では

$$x_{\text{origin}} = 1041[\text{cm}] \tag{B.10.8}$$
$$y_{\text{origin}} = 3520[\text{cm}] \tag{B.10.9}$$

となる。VETO から見たとき、この反転座標上の RIBF の各スラブ[*6]、壁、柱は位置、長さのパラメータと材質を除くと元々の座標上の中性子検出器と全く同じ関係となる。すると、この座標系の下では対中性子検出器用に計算した飛跡の長さの計算[*7]がそのまま適用できる[*8]。

[*6] スラブ slab： 建築用語で床や天井をなす平版のこと

[*7] 詳細はセクション B.8 参照

[*8] プログラミング上の利点としては、対中性子検出器用の飛跡の長さの計算ならびに入射したかどうかを判定するサブルーチンがそのまま (一字一句変えることなく) 流用可能な点を挙げられる

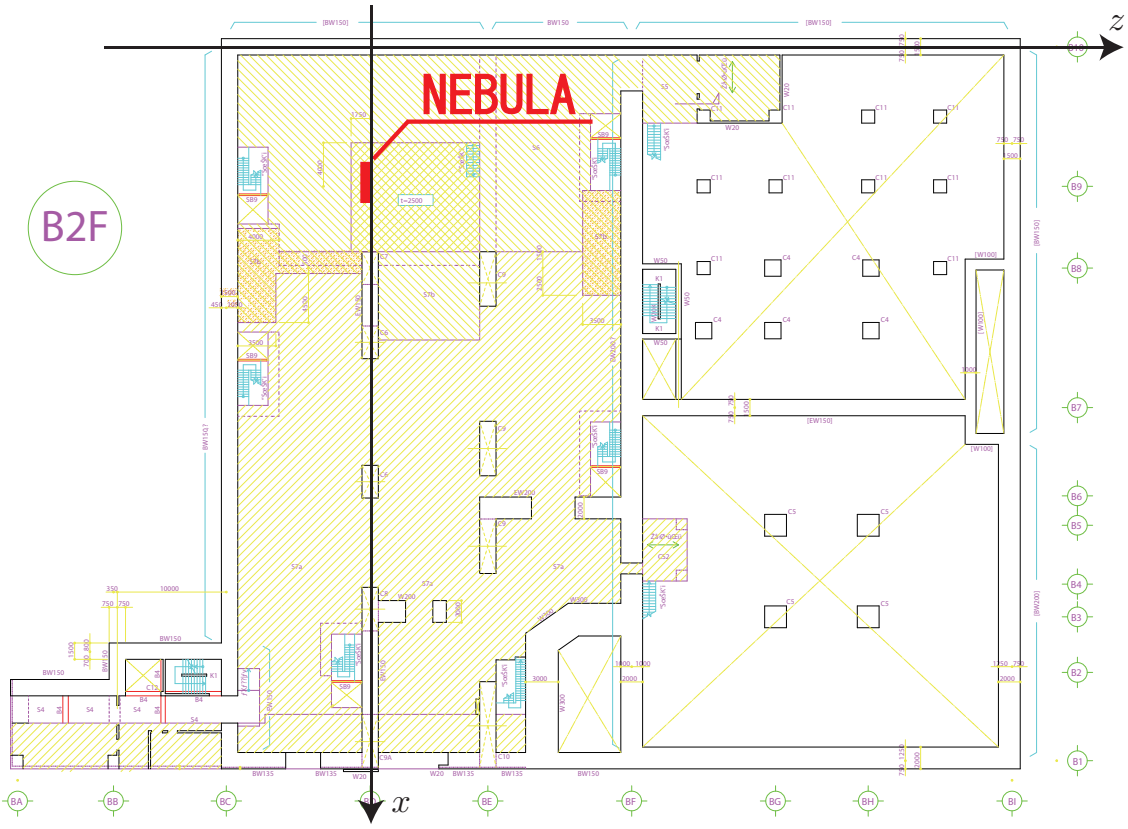


図 B.59: 反転座標系の RIBF 実験棟への適用 (B2F topview)

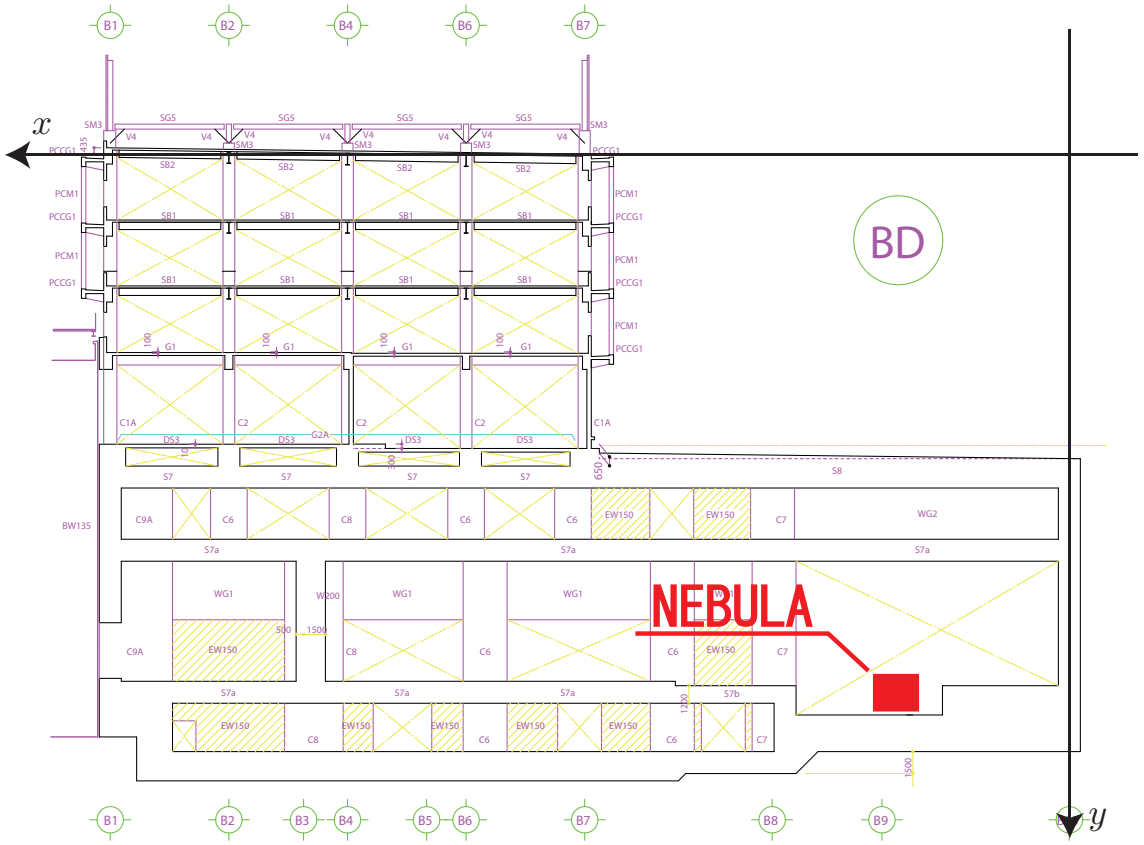


図 B.60: 反転座標系の RIBF 実験棟への適用 (BD sideview)： この定義では反転座標系の原点は空中に浮かぶことになる

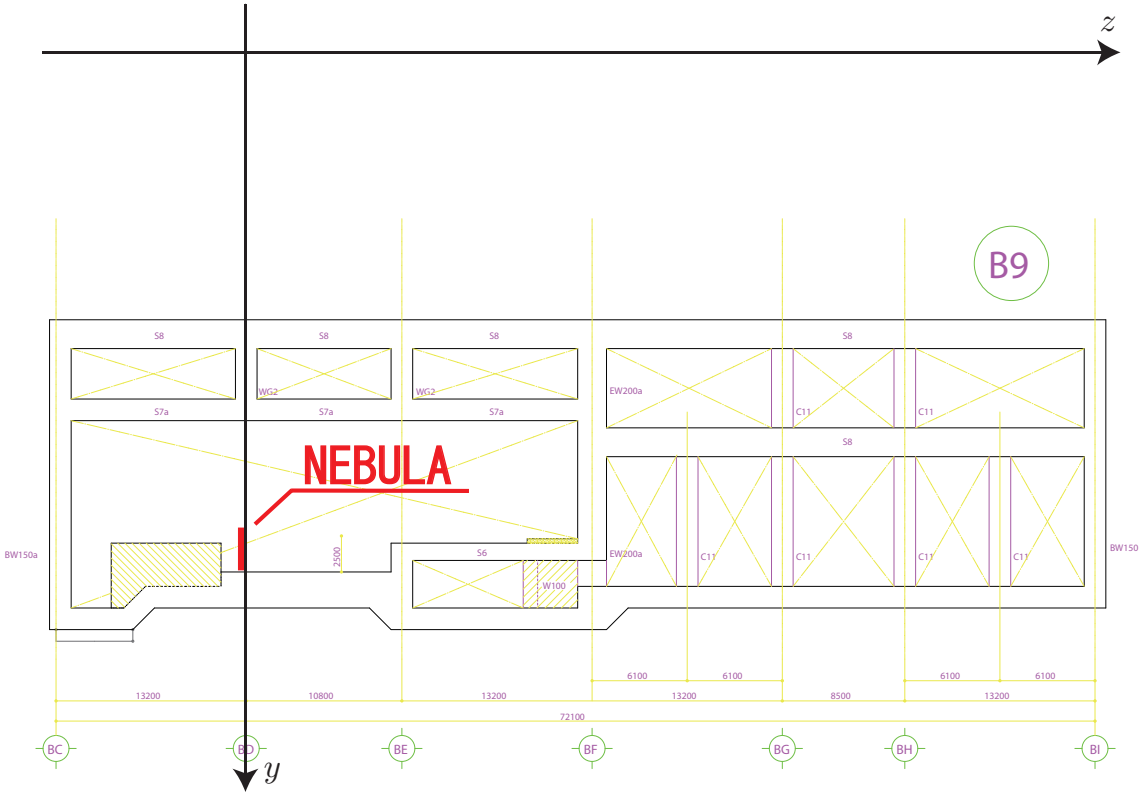


図 B.61: 反転座標系の RIBF 実験棟への適用 (B9 sideview)

B.10.2 コンクリート

建造物に用いられるコンクリートはセメント・水・粗骨材・細骨材の混合物である。コンクリートによるエネルギー損失を計算するため、コンクリートの A、Z、ρ を求める必要がある。以下、コンクリートの一般的な性質ならびに代表的な値を述べる。

中庸熱ポルトランドセメント

セメントペーストの役割は主に以下の 4 点を挙げることができる。

第一に骨材粒の表面を覆うこと。第二に骨材の間隙を満たすこと。第三にまだ固まらないコンクリートが作業に適する軟らかさになるため骨材間の整滑材として働くこと。第四に固まったコンクリートに水密性、強度等を与えることである。

セメントは混合セメント (高炉セメント、シリカセメント、石灰スラグセメント) やアルミナセメント等もあるが、一般に JIS R 5210 で規定されるポルトランドセメントが広く使われる。ポルトランドセメントはさらに組成の違いにより普通、早強、中庸熱、低熱および耐硫酸塩ポルトランドセメントに分別される。この中で、放射線遮断用の重量コンクリートにも利用される中庸熱ポルトランドセメントの代表的な組成 [52] を表 B.3 に示す。この表では灼熱減量[*9]等を含まないため合計は 100% にはならない。

成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
割合 [%]	23.3	3.8	4.0	64.0	1.2	2.0

表 B.3: 中庸熱ポルトランドセメントの組成 [52]

表 B.3 より中庸熱ポルトランドセメントの質量数、電荷がそれぞれ A=25.3,Z=12.6 と求まる。

水

コンクリートにおける水の役割は以下の 2 つである。

第一にセメントと水とを化合させて固める (これをセメントの水和と呼ぶ) ためである。第二に作業に適する軟らかさのコンクリートを得るためである。一般に第二の目的のために必要な水の量の方が多く、これを基準として水とセメントの比 (水セメント比と呼ぶ) が決定される。水セメント比は 0.45〜0.9 である。

粗骨材・細骨材

コンクリートを作る際にはセメント及び水と練り混ぜる砂、砂利、砕石などの骨材と呼ばれる材料が用いられる。骨材の役割としては以下の 3 点を挙げることができる。第一にセメントペーストに対して比較的安価な填充材となること。第二にコンクリートに過重の作用、すりへり、水の浸透、気象作用などに対する抵抗を持たせること。第三にセメントペーストが硬化するとき、および、硬化したセメントペーストにおける水分が変化するときにおこるコンクリートの体積変化の軽減である [53]。一般にコンクリート中において体積比にして 7 割を占める骨材はさらに大きさにより分類される。コンクリート用フルイ規格 5mm 網フルイまたは板フルイを重量で 90% 以上通過するものを細骨材、とどまるものを粗骨材と呼ぶ [54]。

放射線遮断用の重量コンクリートにも広く利用される赤鉄鉱の諸性質を表 B.4 に示す [55]。

[*9] 灼熱減量 loss on ignition : 乾燥した試料を規定の温度 · 時間加熱し，結晶水や揮発成分の離脱による質量の減少分を百分率で示した値。強熱減量とも呼ばれる。

[*1] 骨材比重 : 骨材そのものの比重

質量数 A	陽子数 Z	骨材比重[*1]
31.94	15.2	4〜5.3

表 B.4: 赤鉄鉱の諸性質 [55]

コンクリートの A·Z·ρ

コンクリートにおける水セメント比は 0.45〜0.9 と幅がある。今回は水セメント比 0.55 の配合の例として表 B.5 の配合の値 [52] を用いた[*10]。ただし、水セメント比やスランプの値を変えてもコンクリート中では骨材の割合が 7 割程度と最も多くコンクリートの大半を占めるのでこの配合を変えても荷電粒子に対する阻止能への Z/A の寄与はあまり変わらない。一方で密度の影響は強く受けることになる。

水 [kg/m^3]	セメント [kg/m^3]	細骨材 [kg/m^3]	粗骨材 [kg/m^3]
154	280	694	1157

表 B.5: コンクリートの配合

以上の議論を踏まえてコンクリート全体の質量数 · 陽子数 · 密度を表 B.6 のように決定しこれをシミュレーターに組み込んだ。この密度の値はコンクリートとしては標準的な値である。

質量数 A	陽子数 Z	密度 ρ[g/cm^3]
29.38	14.08	2.3

表 B.6: コンクリート全体の質量数 · 陽子数 · 密度

B.10.3　土壌

NEBULA には RIBF のコンクリートだけでなく地殻を経由したミューオンも到達するはずである。そこで、前サブセクションに示した RIBF の建物だけでなく地殻も再現した。地殻の平均組成を表.B.7 に示す。さらに表.B.7 より求めた地殻の平均的な質量数 A、電荷 Z ならびに地殻の平均的な密度 ρ を表 B.8 に示す [57]。表 B.8 は痕跡元素[*11]等を含まないため合計は 100% にならない。

B.10.4　補正のテスト

前述の座標系がうまくいくことを確かめるためにテストを行った。

NEBULA の向かって右、手前側上方に非常に阻止能の大きな物質を仮想的に配置した。この配置の下では右から入射するミューオンが消えると予測される。

その時の結果を図 B.62 に示す。この結果は方位角 φ の大きな領域でミューオンが入射しなくなっていることを表す (方位角の小さい領域においても粒子数が少なくなっているがこれはこのヒストグラムが VETO と中性子検出器のコイ

[*10] 厳密に言うとこの配合は普通ポルトランドセメントの配合の例である。だが、中庸熱ポルトランドセメントでもあまり変わらない。

[*11] 痕跡元素 trace element：表中に示した以外の多くの元素は普通の岩石中には痕跡程度しか含まれていない。故にこれら ppm のオーダーの僅かな元素を痕跡元素と呼ぶ

元素	割合 [%]	元素	割合 [%]
O	44.60	Ti	0.44
Si	27.72	H	0.14
Al	8.13	P	0.12
Fe	5.00	Mn	0.10
Ca	3.63	F	0.08
Na	2.83	S	0.05
K	2.59	Cl	0.04
Mg	2.09	C	0.03

表 B.7: 地殻の平均組成 [57]

質量数 A	電荷 Z	密度 ρ[g/cm^3]
23.87	11.75	2.8

表 B.8: 地殻の平均的な質量数 A, 電荷 Z, 密度 ρ

ンシデンスの条件の下でプロットしているためである。この詳細は第 15 章で述べた)。これは先に予測した通りの結果である。

ここで、$\varphi = 180°$ 付近においてミューオン数についてカウント数 1000 程度のピークが生じている。この点について補足する。今回、阻止能の大きな物質は NEBULA の右半分全てを覆うようには設定せず、上方に有限の大きさで直方体として設定している。したがって天頂角 $\theta = 90°$ (水平方向) 近くの場合にはこの物質を通過せずに NEBULA に到達することが可能である。特に方位角の大きな領域ではより天頂角が小さい場合でもこの物質を通過しないパスを取れるようになる。それが図 B.62 の上段、(φ, θ) の 2 次元ヒストグラムに現れている。以上のような理由から方位角 $\varphi = 180°$ 付近でピークが生じ、多少のミューオンが入射しているものと考えられる。

B.10.5 RIBF 実験棟の再現

今回のシミュレーターでは RIBF 実験棟 (図 4.2) の地下構造ならびに地上の構造・周囲の土壌を簡易的に再現した。逆に RIBF 加速器棟と従来施設 RARF は再現していない。これは主に現在仮置きされている NEBULA の配置のためである。

RIBF 実験棟内での NEBULA の現在の配置は図 B.59,B.60, B.61 に示した。さらに RIBF の全体図 (図 1.1) を合わせると従来施設 RARF は完全に NEBULA の背面側に来ることが分かる。したがって、中性子検出器部前面の VETO をスタートトリガーとする限りにおいては背面から入射するミューオンをカウントしないので RARF を再現する必要がない。

一方、RIBF 加速器棟 (図 1.1 の壁が薄い水色で描かれた部分) は NEBULA を基準に方位角 0° 付近に位置することが分かる。さらに角度が大きくなると土壌、ついで RIBF 実験棟 (図 1.1 の壁が紫色で描かれた部分) となる。セクション 5.3 で論じたように方位角 0° 付近の NEBULA に対して平行に近い角度で入射するミューオンは中性子検出器に到達しにくく VETO と中性子検出器のコインシデンスイベントではその寄与が小さい。したがって RIBF 加速器棟の影響はかなり小さいものと考えられ、今回は再現していない。

ただし、以上の議論は NEBULA がビームラインに対して平行に仮置きされている現在の配置の下で成り立つものである。図 B.63,B.64 に示した NEBULA の将来的な (そして、最終的な) 配置では今回は無視した RARF と RIBF 実

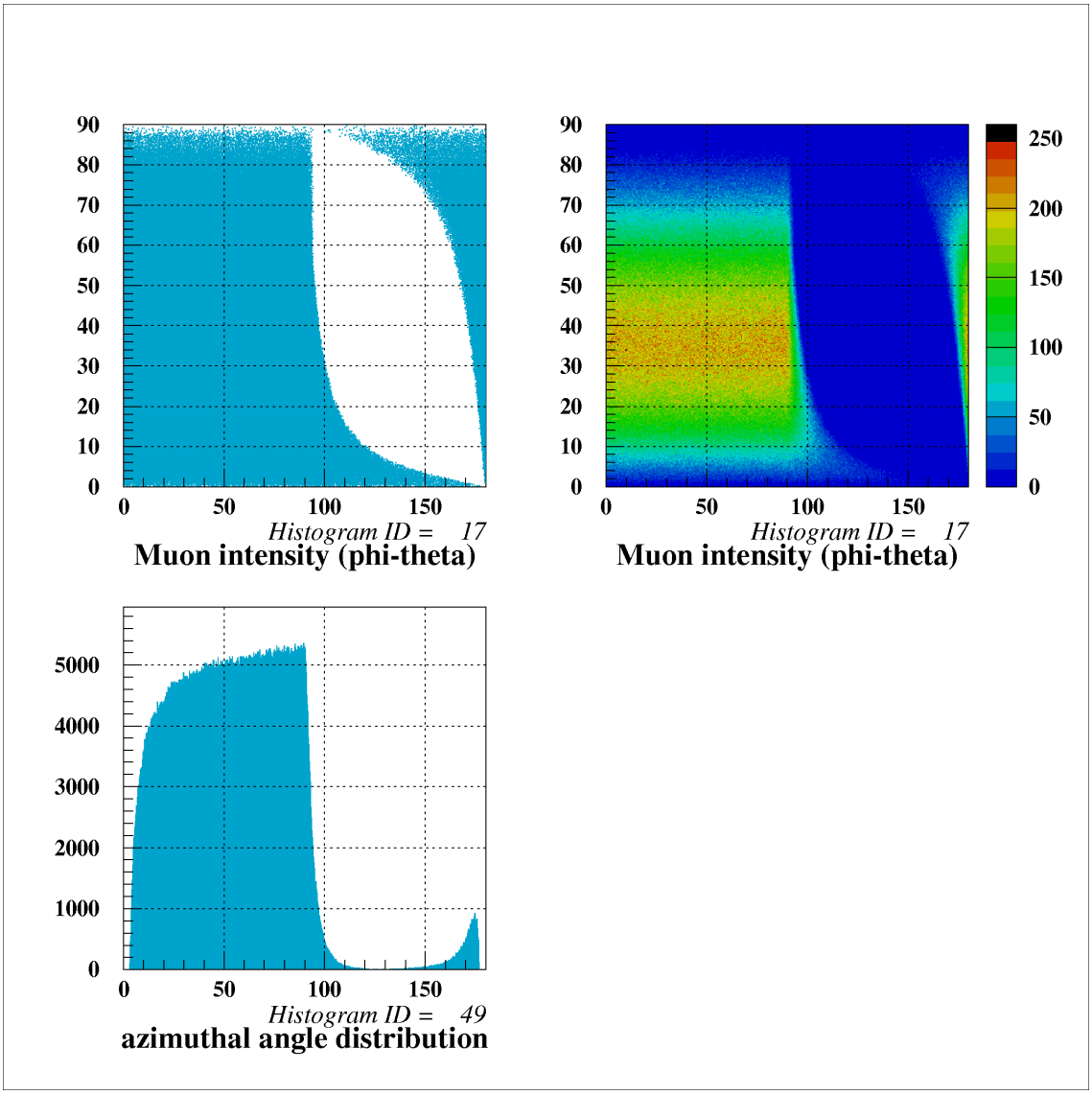


図 B.62: 反転座標系のテスト結果： 上側の HistogramID=17 は共に緑は中性子検出器、横軸:方位角 φ、縦軸:天頂角 θ の到達粒子数を表す二次元ヒストグラムである。右側は粒子数に応じてカラー表示した。下側の HistogramID=49 はその射影で横軸:方位角 φ、縦軸:カウントである。

験棟の影響が無視できなくなる。よって、将来的にはこれらの建物も再現していく予定である。

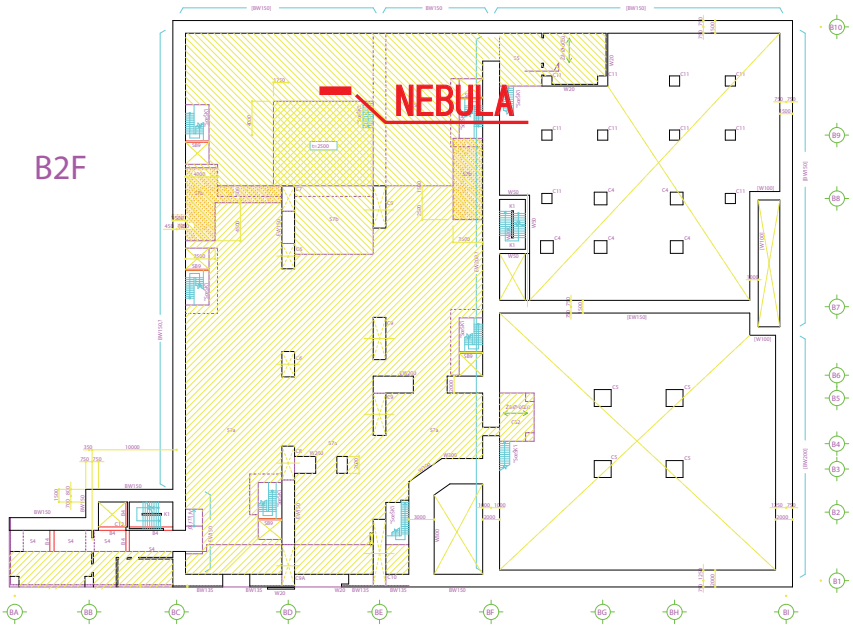


図 B.63: RIBF 実験棟での NEBULA の将来的な配置 (B2F topview)

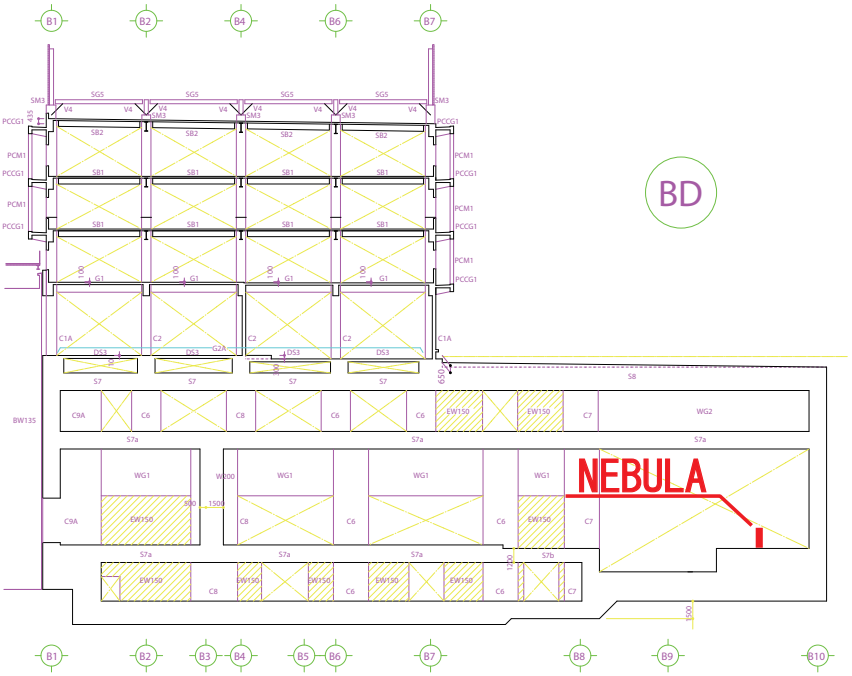


図 B.64: RIBF 実験棟での NEBULA の将来的な配置 (BD sideview)

B.11 ジオメトリの予測値

既に設置が終了した VETO および中性子検出器についてはセクション A.2 で示した位置、サイズの情報を反映した。一方、まだ設置されていない VETO112 と右半分の中性子検出器については設置済みの検出器より予測される以下のジオメトリ (表 B.9) を設定した。この条件の下、NEBULA の 1 スタック目に入射する宇宙線のシミュレーションを行った。

	ID		位置 [cm]
中性子検出器	116	216	194.4
	117	217	206.6
	118	218	218.8
	119	219	231
	120	220	243.2
	121	221	255.4
	122	222	267.6
	123	223	279.8
	124	224	292
	125	225	304.2
	126	226	316.4
	127	227	328.6
	128	228	340.8
	129	229	353
	130	230	365.2
VETO	112		349.2

表 B.9: ジオメトリの予測値： 位置の定義はセクション A.2 に従う

B.12 シミュレーション結果の補足

本論では示さなかったシミュレーション結果についてここで補足して説明する。

B.12.1 VETO 上での位置分布

図 B.65 上段にミューオンの VETO 上での入射位置の分布を、図 B.65 下段には VETO と中性子検出器のコインシデンスをとったイベントの位置分布を示す。

VETO 上の位置分布は基本的には一様分布となっている。これはミューオンの分布が高さ 2m 程度では位置に依らず一様に分布することを反映しているものと考えられる。

一方で、$x = 40, 70, 100 \cdots$ の位置に縦にすじが確認できる。このすじの上ではカウントが他と比べ 2 倍程度になっている。このヒストグラムでは少なくとも 1 つの VETO にヒットした場合これを 1 イベントとカウントするようにしている。そのため、$x = 40, 70, 100 \cdots$ の位置では VETO 同士が重なっている (表 A.26 参照) が故に左側の VETO でも右側の VETO でもカウントするのでカウントが 2 倍となりすじが確認できるのである。

VETO と中性子検出器のコインシデンスをとった図 B.65 下段では VETO 下方でカウントが少なくなっている。ミューオンは上から降り注ぐため下側に入射した場合は中性子検出器に入射せずそのまま下方に突き抜けるイベントが多く生ずると考えられる。ヒストグラムはこのような状況を反映していると言える。

また、VETO の左右両端でも同じような議論が成り立つ。例えば右端では右に突き抜けるようなミューオンは中性子検出器とのコインシデンス条件を満たせない。一方で中央付近であれば方位角に依らずにコインシデンス条件を満たせる。そのため両端ではコインシデンス条件を満たせる粒子が減っている。図 B.65 下段はそのような状況を反映しているものと考えられる。

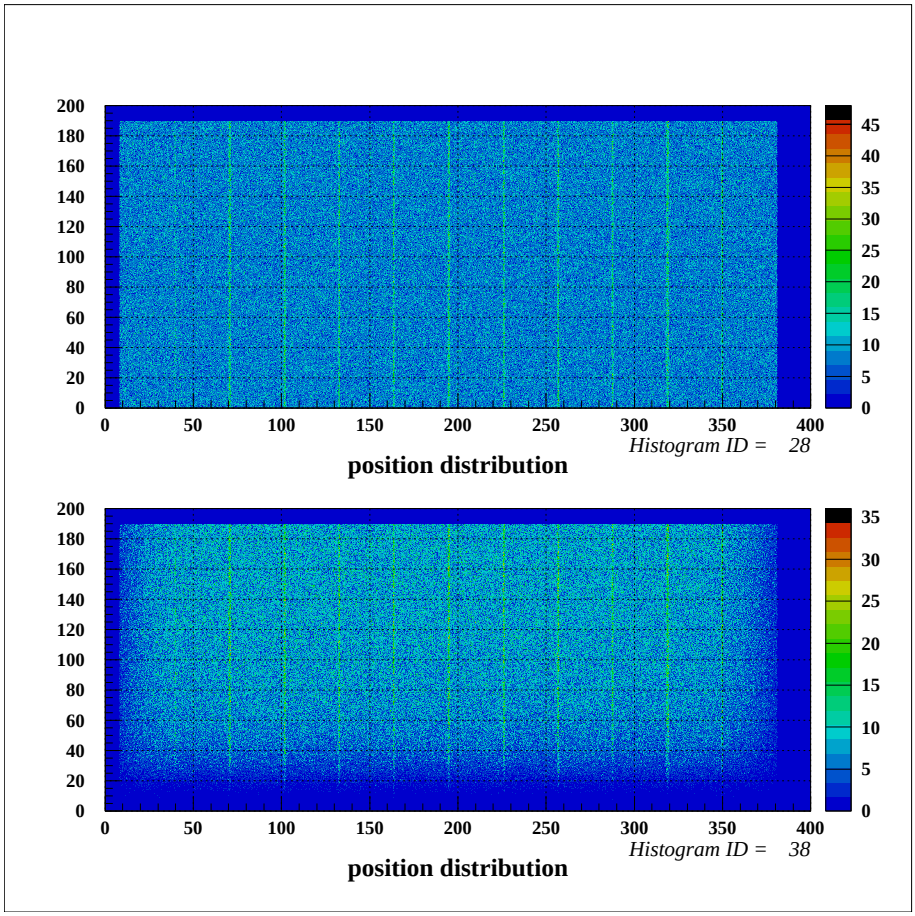


図 B.65: VETO 上での位置分布 上段:VETO 下段:VETO⊗ 中性子検出器 横軸: 水平方向位置 x[cm] 縦軸:鉛直方向位置 y[cm]

B.12.2 VETO でのエネルギー損失分布

図 B.66 上段に VETO101 でのエネルギー損失分布を示す。図 B.66 下段には横軸を VETO ID、縦軸をエネルギー損失とした二次元ヒストグラムを示す。いずれも VETO 単独でのヒットをトリガーとした条件下でのエネルギー損失を示している。よって横幅 3.7m 程度の NEBULA の大きさでは図 B.66 上段に見るように位置依存性が見られないためどの VETO でもほぼ同じ分布を示している。

このエネルギー損失分布の情報は VETO でのスレッショルド決定の際に役立つものと期待される。

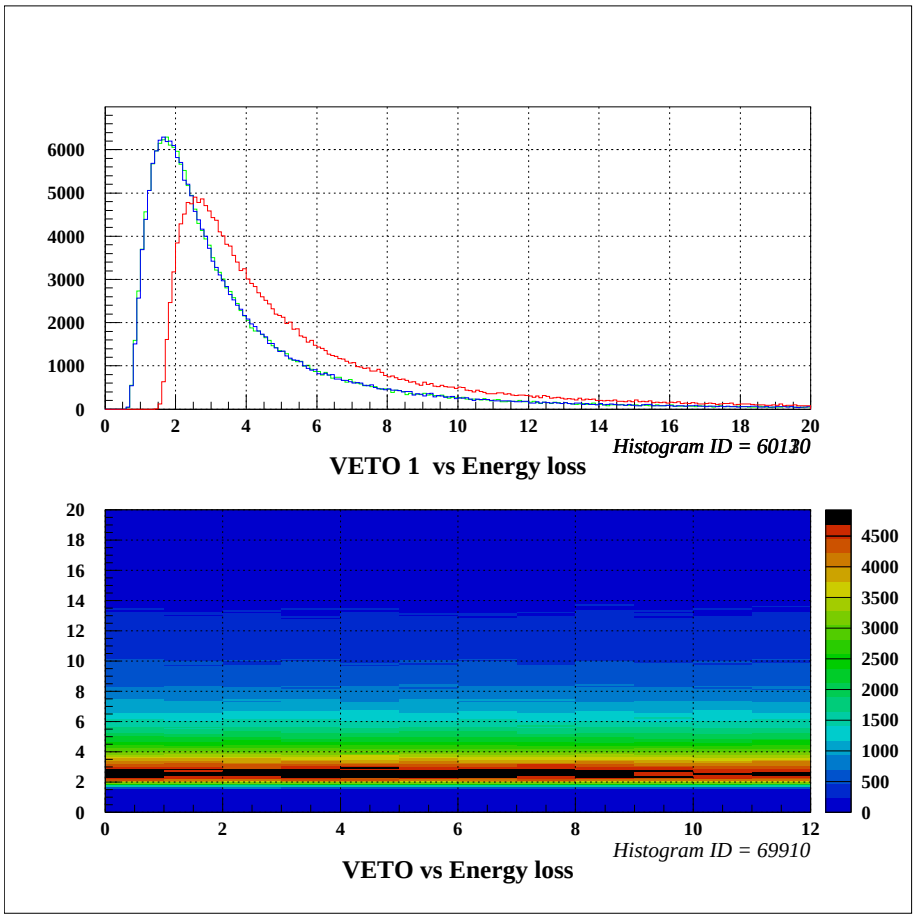


図 B.66: VETO でのエネルギー損失分布 上段:VETO101 のエネルギー損失分布 緑:上部 PMT 青:下部 PMT 赤:相乗平均 横軸: エネルギー損失 [MeV] 縦軸:カウント 下段:VETO 全体のエネルギー損失分布 横軸: VETO ID 縦軸:エネルギー損失 [MeV]

B.12.3 エネルギー損失分布 二次元

セクション 5.6 で見た一次元のヒストグラムを各 VETO に対し中性子検出器部を前後 2 層に分けて横軸を中性子検出器部 ID、縦軸をエネルギー損失とした二次元ヒストグラムを図 B.67, B.68 に示す。

エネルギー損失分布は左右非対称になっている。これはセクション 5.3 で論じたように NEBULA に向かって左右の物質の分布の非対称性を反映しているものと考えられ、セクション 5.4 の結果と同様右に長いテールを引いている様子が確認できる。

さらに分布をよく見ると VETO の眼前にある中性子検出器に対しては低エネルギー領域の分布が隣の中性子検出器と比べて少なくなっている (背面の方がより顕著であり緑の分布のなかに水色の分布が見え分かりやすい)。目の前の中性子検出器に入射する総数自体が少ないわけではないことはセクション 5.4 で明確になっている。このような分布になるのは眼前の中性子検出器に対しては方位角が 90° 近辺にならなければならず、結果として中性子検出器前面から背面に貫通するパスが多くなるのでピーク部分 (赤い部分) に集中するためと考えられる。横の中性子検出器へ入射する場合は、貫通することなくかすめるようなパスが可能なのでより低エネルギー領域にも分布すると考えられる。背面側で顕著なのは前面よりも中性子検出器に入射可能な角度の範囲がより狭くなるためである。

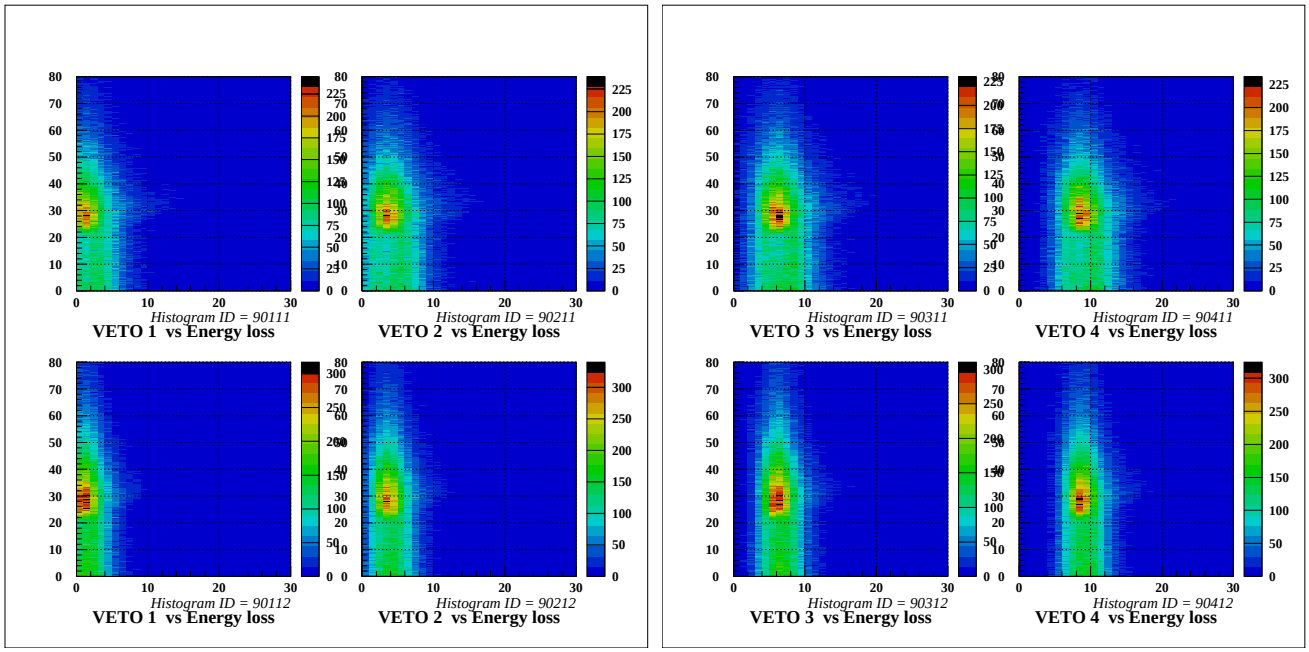


図 B.67: エネルギー損失分布 (相乗平均) VETO101〜104 横軸:中性子検出器 ID 縦軸:エネルギー損失 [MeV] 上段:NEBULA 背面 下段:NEBULA 前面

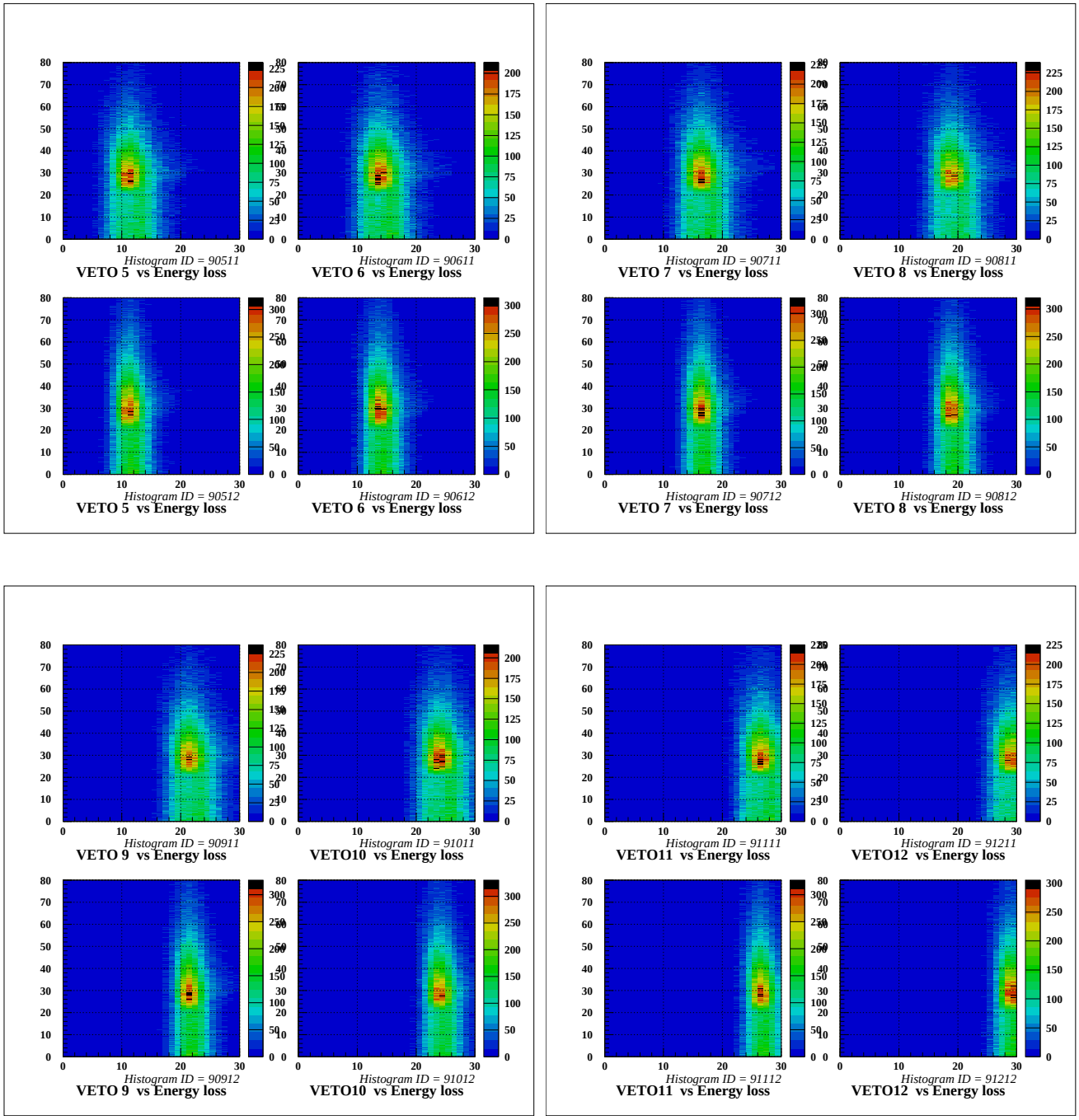


図 B.68: エネルギー損失分布 (相乗平均) VETO105〜112 横軸:中性子検出器 ID 縦軸:エネルギー損失 [MeV] 上段:NEBULA 背面 下段:NEBULA 前面

Appendix.C　その他

C.1　中性子検出の原理

C.1.1　中性子と物質との相互作用

中性子は電荷を持たないため、荷電粒子と異なり直接電離を起こさない。そのため荷電粒子とは異なる検出の方法が必要である。また、検出効率も低くなる。一方でクーロン力を受けないためエネルギーが低くても原子核付近まで接近が可能となる。したがって、物質との相互作用は中性子が原子核付近まで接近して核力が作用する領域で起こす原子核反応 (nuclear reaction) に限られる一方でそうした反応が起こる確率は高くなる。以下、中性子と物質との相互作用の一般論を述べる [58][59]。ここで中性子 n が入射し粒子 A が放出されるときこれを (n,A) と表記する。

弾性散乱 elastic scattering (n,n)

一般に中性子が原子核と衝突し、衝突後に再放出される過程を散乱と呼ぶ。その中でも中性子放出後に核が励起状態にならない場合を弾性散乱と呼ぶ。高速中性子の場合は主要な反応は弾性散乱である。さらに弾性散乱は 2 つの散乱に場合分けできる。中性子が核の中に取り入れられずに散乱するポテンシャル散乱 (もしくは shape elastic scattering) と中性子が核の中に取り入れられて複合核を作った後に元のエネルギーで飛び出す場合 (compound elastic scattering) である。ただし、高速中性子の場合はポテンシャル散乱の方が支配的である。

非弾性散乱 inelastic scattering (n,n),(n,nγ),(n,2n)

中性子が核の中に取り入れられて複合核が作られた後、中性子が放出される。この時点で中性子の持っていたエネルギーの一部が原子核を励起状態に遷移するのに使われて残留核が励起状態にあるような散乱をを非弾性散乱と呼ぶ。非弾性散乱は中性子のエネルギーが核の第一励起準位以上の場合にのみ発生する。励起された核は γ 線等の粒子を放出して基底状態へ戻る。

捕獲反応 neutron capture (n,γ)

中性子が原子核に捕獲され励起エネルギーが γ 線の形で放出される過程を捕獲反応と呼ぶ。熱中性子では多くの原子核でこの反応をおこす。捕獲反応により放出される γ 線のエネルギーは原子核の結合エネルギー (数 MeV) 程度である。

荷電粒子放出反応 (n,p),(n,d),(n,α),(n,t),(n,αp)

放出される粒子は陽子、重陽子、三重陽子、α 粒子などである。荷電粒子が原子核の外に出るためには核のまわりのクーロンポテンシャルを越える必要がある。よってポテンシャルの山が低くなる Z の小さい原子核ほど発生しやすい。

核分裂 fission (n,f)

複合核が 2 つの核破砕片とその他数個の中性子とに分裂する過程である。高速中性子では多数の重い核が核分裂を起こす。

蒸発 evapolation

100MeV あるいはそれ以上の中性子が重い原子核に入射し原子核が非常に高く励起され様々な粒子 (中性子、陽子、α あるいはその他の軽い核) を放出する過程である。

C.1.2 中性子の検出に用いる反応

中性子と物質は前述のような反応を起こすが、中性子の検出は荷電粒子の測定により行う。この中性子の検出の際の荷電粒子生成の相互作用としては以下の 3 つを挙げることができる。

- 核反応による荷電粒子生成
  前述の荷電粒子放出反応で放出された荷電粒子を検出して、中性子を検出する。
- 中性子による放射化
  中性子による核反応の生成核が放射能を有する場合。放射能の検出により中性子を検出する。
- 中性子による原子核の弾性散乱
  中性子が原子核と弾性散乱をして、反跳核が生成される。反跳核は荷電粒子であるため、反跳核の検出により中性子を検出する。この際最も重要なのは陽子 1 個電子 1 個の水素の反跳、つまり実質的な陽子反跳である。

最後に挙げた弾性散乱により生ずる反跳陽子を利用する陽子反跳法が高速中性子の検出に広く使われている。

C.1.3 中性子とプラスチックの反応

以上を踏まえて C と H からなるプラスチックと中性子の反応を表 C.1 に示す。プラスチックはスチルベン、アントラセンなどの有機シンチレータとならんで多量の H と残りは C という単純な組成であり、陽子反跳法に非常に適している素材である。

^{1}H	$n + {}^{1}H \rightarrow n + {}^{1}H$ (主に弾性散乱)
^{12}C	$n + {}^{12}C \rightarrow n + {}^{12}C$ (弾性散乱)
	$n + {}^{12}C \rightarrow n + {}^{12}C^{*} \rightarrow n + {}^{12}C + \gamma(4.43MeV)$
	$n + {}^{12}C \rightarrow \alpha + {}^{9}Be$
	$n + {}^{12}C \rightarrow n\,' + 3\alpha$
	$n + {}^{12}C \rightarrow {}^{3}He + {}^{10}Be$
	$n + {}^{12}C \rightarrow p + {}^{12}Be$
	$n + {}^{12}C \rightarrow n + p + {}^{11}B$
	$n + {}^{12}C \rightarrow n + n + {}^{11}C$
	$n + {}^{12}C \rightarrow d + {}^{11}B$
	$n + {}^{12}C \rightarrow t + {}^{10}B$
	$n + {}^{12}C \rightarrow \gamma + {}^{13}C$

表 C.1: 中性子 n と ^{1}H、^{12}C の反応

C.1.4　有機シンチレータの発光機構

以下にプラスチックシンチレータを含む有機シンチレータの発光機構を述べる [58]。

シンチレーションの発光機構は構成している分子内の電子の励起と基底状態へ遷移する際の発光で説明される。

有機分子の π 電子エネルギー準位を図 C.1 に示す。π 電子系の一重状態 S_0,S_1,... は π 電子の電離エネルギー I_π まで続く。さらにこれらのエネルギー準位はおよそ 0.16eV 間隔で振動の準位 S_{00},S_{01},... と分かれる。他にエネルギーの低い三重状態 T_0,T_1,... が存在する。

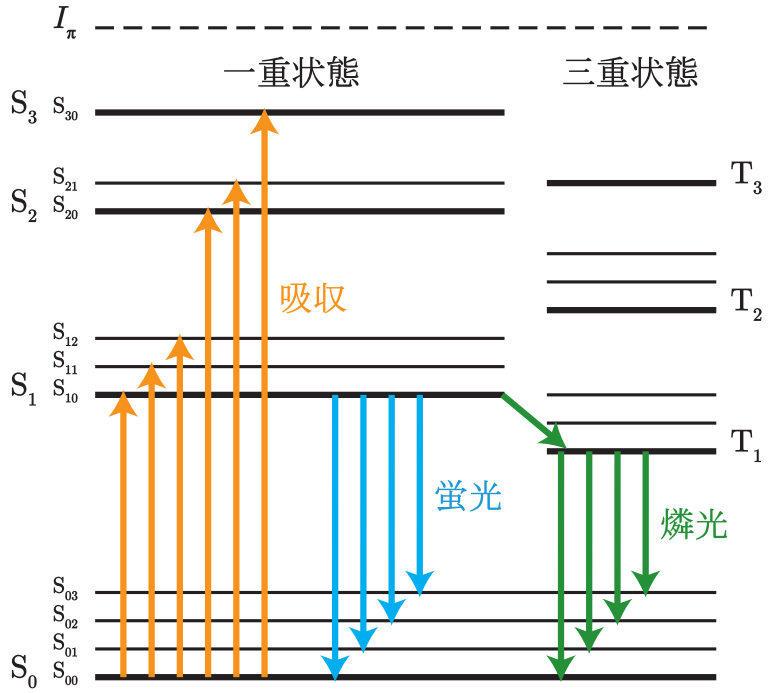


図 C.1: 有機分子の π 電子エネルギー準位

蛍光

S1 → S0 への輻射遷移に相当しその寿命は $10^{-8} \sim 10^{-9}$[s] で分子の振動の時間 (10^{-12})[s] に比べ十分長い。

蛍光量 I は時間 t とともに指数関数的に (C.1.1) にしたがい減少する。

$$I = I_0 e^{-\lambda t} \tag{C.1.1}$$

燐光

蛍光よりも発光波長が長く減衰時間は 10^{-4} ～ 数 [s] で指数関数的に減少する。S_1 に励起された電子が寿命の長い T_1 に発光を伴わないで移行、ついで $T_1 \rightarrow S_0$ への遷移の際に光を放出する。

遅い蛍光

発光を伴わない移行によってできた T_1(もしくは他の準安定状態 M) の電子が十分なエネルギーを得て S_1 に移り $S_1 \rightarrow S_0$ へと遷移する際に光を放出する。故に蛍光と同じ発光波長と長い減衰時間をもつが、光量は指数関数的減少を示

さない。

C.2 クロストークイベントの排除

複数個の中性子の同時検出のため複数層の検出器を設置する必要がある。だが、複数個の中性子の同時検出は極めて難しい。手前の層の検出器で検出された中性子が散乱の結果、後ろの層の検出器でも検出されてしまうイベントが存在するためである。このようなイベントをクロストークイベントと呼ぶ。

このようなクロストークイベントの排除のために中性子の速度の違いを利用する。手前の層で散乱された中性子は、散乱されずに直接検出される中性子よりもその分速度が遅くなる。したがって速度が低下している中性子を除外して解析を行う。散乱していないが、除外する条件を満たす中性子についてはその補正を行う。このような手法によりクロストークイベントを排除することが可能となる。

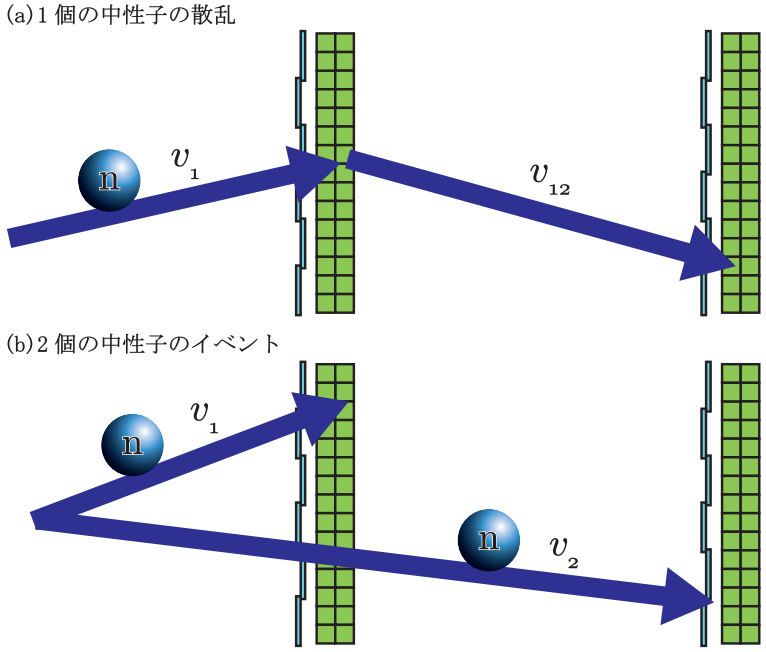


図 C.2: (a)：1 個の中性子の散乱 (b)：2 個の中性子のイベント $v_1 \simeq v_2 > v_{12}$ となることを利用する

C.3 光電子増倍管の信号チェック時の実験条件

セクション 6.2 で行った光電子増倍管の信号チェック時の実験条件を表 C.2,C.3 に示す。ケーブル長の変更を行ったのは浮遊容量などが原因として疑われたためである。

C.4 ペデスタル補正

ADC の 0ch はエネルギー 0[MeV] に対応しない。そこでマスタートリガーにクロック信号を入れることで回路などに由来するノイズに相当するピークを得る (図 C.3)。ここで得られたピークをガウス分布でフィットし、その平均値を

[*1] 今回の実験は浜松ホトニクス側の行った実験をこちらでも行ったものである。よって、実験番号は浜松ホトニクス側と対応させている。「4」は内部の配線をカットするものであったので行わなかった。

実験番号[*1]	出力	ケーブル長 [m]	接続
4466-1	A1	5	オシロスコープ ch1
	A2	5	オシロスコープ ch2
4466-2	A1	5	オシロスコープ ch1
	A2	開放	
4466-3	A1	T 字の一方を 50Ω で terminate、一方をオシロスコープへ	
	A2	開放	
4466-4	未実施[*1]		
4466-7	A1	0.5	オシロスコープ ch1
	A2	0.5	オシロスコープ ch2
4466-8	A1	5+5	オシロスコープ ch1
	A2	50Ω terminater 光電子増倍管に直付け	
4466-9	A1	5+5	オシロスコープ ch1
	A2	0.5	オシロスコープ ch2

表 C.2: 光電子増倍管 BA4469 の実験条件：「5+5」とは 5m のケーブル 2 本をつないで用いたことを表す。

実験番号	出力	ケーブル長 [m]	接続
3231-1	A1	5	オシロスコープ ch1
	A2	5	オシロスコープ ch2
	DY	開放	
3231-2	A1	5	オシロスコープ ch1
	A2	5	オシロスコープ ch2
	DY	50Ω terminater 光電子増倍管に直付け	
3231-3	A1	5	オシロスコープ ch1
	A2	5	オシロスコープ ch2
	DY	10	50Ω terminate
3231-4	A1	1+1	オシロスコープ ch1
	A2	5+5	50Ω terminate
	DY	50Ω terminater 光電子増倍管に直付け	
3231-5	A1	1+1	オシロスコープ ch1
	A2	5+5	50Ω terminate
	DY	5+5	50Ω terminate
3231-6	A1	1+1	オシロスコープ ch1
	A2	5+5	50Ω terminate
	DY	50Ω terminater 光電子増倍管に直付け	
3231-7	A1	1+1	オシロスコープ ch1
	A2	0.3	50Ω terminate
	DY	開放	

表 C.3: 光電子増倍管 BA3231 の実験条件

実験データから差し引くペデスタル補正を行った。今回はこのペデスタル補正を以ってオフセット補正とみなした。

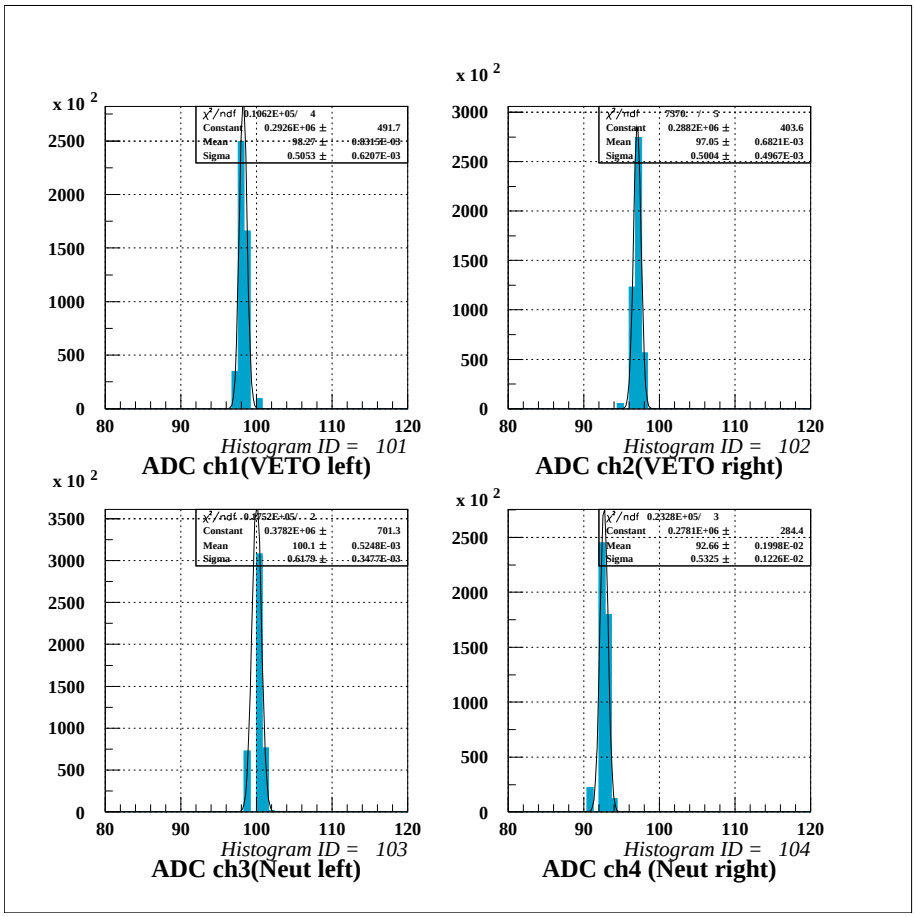


図 C.3: ペデスタル

参考文献

[1] H.Sakurai, "RI Beam Factory Project at RIKEN", Nuclear Physics A. **805**, 526 (2008)

[2] Y.Yano, "The RIKEN RI Beam Factory Project: A status report", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. **261**, 1009 (2007)

[3] T.Kubo *et al.*, "Status and Overview of Superconducting Radioactive Isotope Beam Separator BigRIPS at RIKEN", Applied Superconductivity, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **17**, 1069 (2007)

[4] T.Kubo, "In-flight RI beam separator BigRIPS at RIKEN and elsewhere in Japan", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. **204**, 97 (2003)

[5] 独立行政法人 理化学研究所 和光研究所仁科加速器研究センター, 『RI ビームファクトリー計画』 (2006)

[6] I.Tanihata *et al.*, "Revelation of thick neutron skins in nuclei", Physics Letters B. **289**, 261 (1992)

[7] I.Tanihata *et al.*, "Measurements of Interaction Cross Sections and Nuclear Radii in the Light p-Shell Region", Physical review letters. **55**, 2676 (1985)

[8] T.Nakamura *et al.*, "Halo Structure of the Island of Inversion Nucleus ^{31}Ne", Physical review letters. **103**, 262501 (2009)

[9] 小林信之 " 分解反応による新ハロー構造の探索" 東京工業大学 大学院 修士論文 (2010)

[10] T.Kubo *et al.*, "The RIKEN radioactive beam facility", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. **70**, 309 (1992)

[11] H.Sakurai *et al.*, "Production and identification of new neutron-rich nuclei, ^{31}Ne and ^{37}Mg, in the reaction 80A MeV ^{50}Ti+^{181}Ta", Physical review C. **54**, 53 (1996)

[12] T.Ohnishi *et al.*, "Identification of New Isotopes ^{125}Pd and ^{126}Pd Produced by In-Flight Fission of 345 MeV/nucleon ^{238}U: First Results from the RIKEN RI Beam Factory", Journal of the Physical Society of Japan. **77**, 083201 (2008)

[13] P. Doornenbal *et al.*, "Spectroscopy of ^{32}Ne and the " Island of Inversion " ", Physical review letters. **103**, 032501 (2009)

[14] Y.Satou *et al.*, "Unbound excited states in ^{19,17}C", Physics Letters B **660** 320 (2008)

[15] T.Kobayashi, "Large-Acceptance Multi-Particle Spectrometer SAMURAI", TAC[*1]-05 (2005)

[16] K.Yoneda *et al.*, "Current status of SAMURAI", RIKEN Acellerator Progress Report. **42**, 26 (2009)

[17] 佐藤義輝 "SAMURAI 中性子ホドスコープ架台仕様" (2008)

[18] 田中佳奈, "CI 工業製中性子検出器に関する報告" (2009)
`http://be.nucl.ap.titech.ac.jp/~tanaka/ci.pdf`

[19] 田中佳奈, " 中性子検出器の光電子増倍管の時間特性に関する報告" (2008)
`http://be.nucl.ap.titech.ac.jp/~tanaka/report.pdf`

[20] 田中佳奈, " 不安定核の陽子非弾性散乱による新魔法数 N=16 の研究" 東京工業大学 大学院 修士論文 (2010)

[*1] International Tehnical Advisory Committee

[21] Saint-GobainIndustrial Ceramics, Inc. "BC-400/BC-404/BC-408/BC-412/BC-416 Premium Plastic Scintillators"

[22] Hamamatsu photonics, "HAMAMATSU PHOTOMULTIPLIER TUBE R7723,R7724,R7725", http://jp.hamamatsu.com/resources/products/etd/pdf/R7723_TPMH1315E01.pdf

[23] Costruzioni Apparecchiature Elettroniche Nucleari Electronic Instrumentation, "Technical Information Manual MOD. V792 series MOD. V792 N series 2009/5/14 Revision n. 17" http://www.caen.it/getattach.php?mod=V792&obj=mn&id=2239

[24] Costruzioni Apparecchiature Elettroniche Nucleari Electronic Instrumentation, "Technical Information Manual MOD. V775 series MOD. V775 N series 17 March 2008 Revision n. 13" http://www.caen.it/getattach.php?mod=V775&obj=mn&id=1951

[25] Costruzioni Apparecchiature Elettroniche Nucleari Electronic Instrumentation, "Technical Information Manual MOD. V895 series 19 March 2009 Revision n. 3" http://www.caen.it/getattach.php?mod=V895&obj=mn&id=2208

[26] Costruzioni Apparecchiature Elettroniche Nucleari Electronic Instrumentation, "Technical Information Manual MOD. VME8100 21 March 2008 Revision n.1" http://www.caen.it/getattach.php?mod=VME8100&obj=mn&id=2052

[27] Costruzioni Apparecchiature Elettroniche Nucleari Electronic Instrumentation, "Technical Information Manual MOD. SY 1527 20 March 2008 Revision n. 15" http://www.caen.it/getattach.php?mod=SY1527LC&obj=mn&id=1954

[28] Costruzioni Apparecchiature Elettroniche Nucleari Electronic Instrumentation, "Technical Information Manual MOD. SY 1527 14 January 2010 Revision n.3" http://www.caen.it/getattach.php?mod=A1535S&obj=mn&id=2365

[29] Technoland, "N-RS 413 V2 16CH 2-Fold Coincidence" http://www.tcnland.co.jp/nim/nrs413v2.htm

[30] Technoland, "N-TM 605 2CH 20-OUT Fanout" http://www.tcnland.co.jp/nim/ntm605.htm

[31] 林栄精器株式会社, http://www.repic.co.jp/contents/products/huber/seihin/conecta/shv.html

[32] 林栄精器株式会社, http://www.repic.co.jp/contents/products/huber/seihin/conecta/bnc.html

[33] HUBER+SUHNER, "HUBER+SUHNER DATA SHEET Coaxial Cable: RG_58_C/U " http://www.repic.co.jp/contents/products/huber/seihin/rf/pdf/rg58cu.pdf

[34] HUBER+SUHNER, 'HUBER+SUHNER DATA SHEET Coaxial Cable: RG_59_B/U " http://www.repic.co.jp/contents/products/huber/seihin/rf/pdf/rg59bu.pdf

[35] HUBER+SUHNER, "HUBER+SUHNER DATA SHEET Coaxial Cable: RG_174_/U " http://www.repic.co.jp/contents/products/huber/seihin/rf/pdf/rg174u.pdf

[36] REPIC 林栄精器株式会社, http://www.repic.co.jp/contents/products/repic/seihin/rpv_090.html

[37] 林栄精器株式会社, " ＲＰＮ-００５-１５３ 取扱説明書　電源検査書" http://www.repic.co.jp/contents/products/repic/pdf/rpn-005-153.pdf

[38] Phillips Scientific, "Quad Majority Logic Unit NIM MODEL 756" http://www.repic.co.jp/contents/products/phill/pdf/756ds.pdf

[39] REPIC 林栄精器株式会社, ” ＲＰＶ-１３０”
http://www.repic.co.jp/contents/products/repic/seihin/rpv_130.html
[40] 田中佳奈, ”NEBULA NEUT1 面 60 本・VETO24 本の PMT の gain” (2009)
http://be.nucl.ap.titech.ac.jp/~tanaka/nebula_gain.pdf
[41] W-M Yao *et al.*, ”Journal of Physics G : Nuclear and Particle Physics” **33** (2006)
[42] D.Reyna, ”A simple Parameterization of the Cosmic-Ray Muon Momentum Spectra at the surface as a Function of Zenith Angle ” arXiv:hep-ph/0604145. (2006)
[43] M.Matsumoto *et al.*, ”Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generato”, ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation **8**, 3 (1998)
[44] W.R.Leo, ”Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments”, Springer, (1994)
[45] H.Bichsel, ”Straggling in thin silicon detectors”, Reviews of Modern Physics. **60**, 663 (1988)
[46] L.Landau, J. Physics (USSR) **8**, 201 (1944)
[47] P.V.Vavilov, ”Ionaiztion Losses of High-Energy Heavy Particles” Sov.Phys. JETP **5**, 749 (1957)
[48] K.S.Kölbig, ”G110: Landau Distribution”
http://wwwasdoc.web.cern.ch/wwwasdoc/shortwrupsdir/g110/top.html
[49] A.Rotondi *et al.*, ”G115: Approximate Vavilov Distribution and its Inverse”
http://dollywood.itp.tuwien.ac.at/cernlib/shortwrupsdir/g115/top.html
[50] A.Rotondi *et al.*, ”G116: Vavilov Density and Distribution Functions”
http://wwwasdoc.web.cern.ch/wwwasdoc/shortwrupsdir/g116/top.html
[51] 西村純 『実験物理学講座 25　宇宙放射線』 共立出版 (1986)
[52] 笹井芳夫、大濱嘉彦、松井勇、出村克宣 『新版 建築材料学』 理工図書 (2000)
[53] 吉田徳次郎 『コンクリート及鉄筋コンクリート 施行方法』 丸善 (1966)
[54] 高杉造酒太郎『建築工事標準仕様書・同解説　B　JASS5　鉄筋コンクリート工事　[昭和 32 年（1957 年）改訂]　改訂版』 日本建築学会 (1957)
[55] 浜田稔 『建築材料学』 丸善 (1964)
[56] 十代田三郎 『建築材料一般』 産業図書 (1961)
[57] A.Homes 著, 上田誠也、貝塚爽平、兼平慶一郎、小池一之、河野芳輝訳 『一般地質学 I 原書第 3 版』 東京大学出版会 (1984)
[58] 山崎文男 『実験物理学講座 26　放射線』 共立出版 (1973)
[59] 三浦功、菅浩一、俣野恒夫 『放射線計測学』 裳華房 (1962)
[60] ”Overview of the RIBF Project”, TAC-05 (2005)

謝辞

本研究を行うにあたって、多くの方の多大なるご協力、ご助言を頂きました。指導教官である中村隆司教授には研究を進める上での的確かつ丁寧なご指導により、物理全般に対する理解が深まったのはもちろんのこと、物理に臨む姿勢というものを学びました。さらにプレゼンテーションについても熱心にご指導していただきました。助教の近藤洋介氏は NEBULA の実際の作業全般において中心的な役割を担われており、私も物理だけでなく部品の設計や組み立て、さらに実験に関して生の知識を得ることができました。また、RIBF での実験 (Day-two campaign) の際には夜通しビーム生成や解析、BigRIPS や ZDS について説明していただきました。同研究室の田中佳奈氏には中性子検出器や DAQ 等について様々なことを教わり、修士論文でお忙しい中にありながらも私の些細な質問にも丁寧に対応していただきました。田中氏の書かれた各種資料や解析のコードのお陰で実験や解析をスムーズに進めることが出来ました。小林信之氏には特にコンピューターに関して多くのことを教わり、また困ったときには助けていただきました。小林氏の Linux に関する知識のお陰で研究が相当に効率良くなりました。河田鷹介氏にもコンピューターに関して多くのことを教わりました。河田氏のお力添えがなければシミュレーターの開発は相当に遅れていたか、完成しなかったかもしれません。田中直樹氏、出口茂樹氏には研究生活を進める上で多くのアドバイスをいただき、理研での NEBULA の作業にも何度となく協力していただきました。Matta 氏、Tuff 氏 (from University of York) にも理研での NEBULA の作業を手伝っていただきました。同じ学部四年の高橋好太郎氏とはゲインのテストや VETO のテストなど実験を協力して行いました。

本研究を支えて頂いた多くの方々の尽力なくして本論文が完成の日を迎えることはありませんでした。深く感謝致します。